INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2021 • N.º 533 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SUPERNOVAS EXTREMAS

Una serie de explosiones estelares inusuales ponen a prueba nuestras ideas sobre la vida y muerte de las estrellas

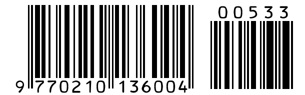
BIOLOGÍA
Los virus de nuestro cuerpo

REDES SOCIALES
La ciencia de la manipulación

AGRICULTURA
En busca de una fotosíntesis más eficiente



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
SUPERNOVAS EXTREMAS | EL VIROMA HUMANO | UNA FOTOSÍNTESIS MÁS EFICIENTE
N.º 533
FEBRERO 2021



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Febrero 2021, Número 533



66

ARTÍCULOS

ASTRONOMÍA

18 Supernovas extremas
La mayoría de las estrellas mueren de formas predecibles, pero cada vez se conocen más supernovas extrañas que desafían las ideas tradicionales. *Por Anna Y. Q. Ho*

26
INFORME ESPECIAL
LAS 10 TÉCNICAS EMERGENTES MÁS PROMETEDORAS DEL MOMENTO
Computación espacial, medicina digital, hidrógeno verde, aviación eléctrica, síntesis de genomas completos, detección cuántica y otras cuatro técnicas que cambiarán el mundo. *Una colaboración entre* Scientific American *y el Foro Económico Mundial.*

REDES SOCIALES

38 La economía de la atención
Comprender el modo en que los algoritmos y los manipuladores explotan nuestras vulnerabilidades cognitivas nos ayuda a defendernos. *Por Filippo Menczer y Thomas Hills*

HISTORIA DE LA ELECTRÓNICA

52 El protagonista silencioso de la revolución digital
El transistor de efecto campo constituye la base de toda la electrónica moderna. Concebido hace casi un siglo, su existencia y su compleja historia siguen siendo grandes desconocidas para el gran público. *Por Ignacio Mártil de la Plaza*

BIOLOGÍA

58 En busca de una fotosíntesis óptima
Mejorar la eficiencia del proceso fotosintético es una de las metas propuestas para aumentar el rendimiento agrícola en un planeta cada vez más poblado. Pero el camino está plagado de obstáculos. *Por Renato Bruni*

FÍSICA TEÓRICA

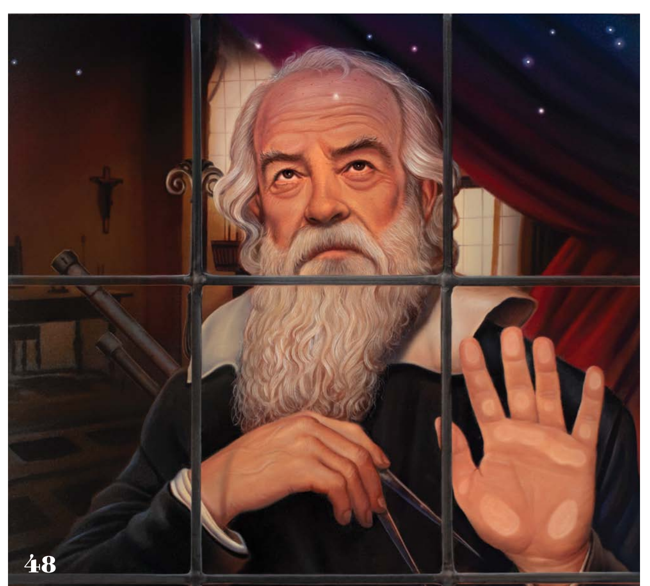
66 La paradoja más famosa de la física se acerca a su fin
Varios trabajos recientes han demostrado que los agujeros negros pueden liberar información. El resultado parece resolver una paradoja propuesta hace cinco décadas por Stephen Hawking. *Por George Musser*

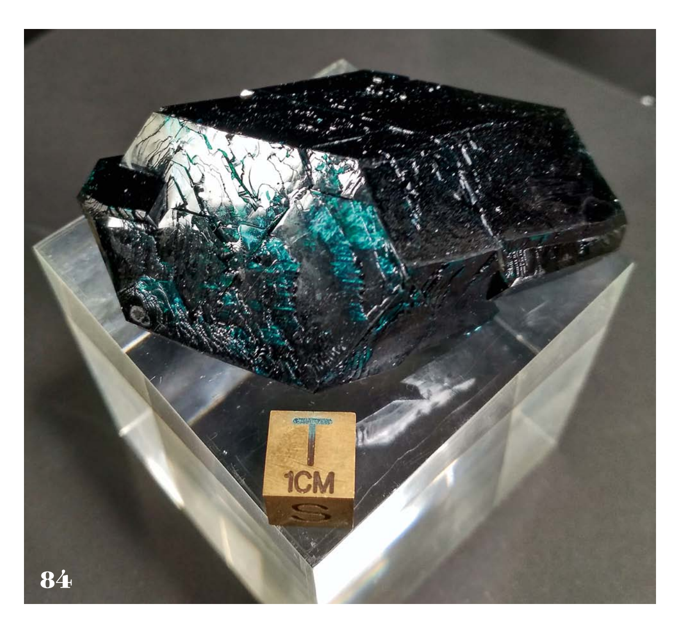
MEDICINA

76 Los virus de nuestro cuerpo
Billones de virus integran el viroma humano. Algunos son dañinos, pero otros podrían resultarnos beneficiosos si aprendemos a servirnos de ellos. *Por David Pride*

GETTY IMAGES/JANIECBROS/ISTOCK


8


48



84

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
Agua solar. Aneurisma en una placa. Tijeras de ADN. Las patas autónomas de los arácnidos. La visión infrarroja de las serpientes.

10 Panorama
Comienza a aclararse la misteriosa pérdida de olfato debida a la COVID-19. *Por Stephani Sutherland*
Inteligencia artificial y plegamiento de proteínas. *Por Ewen Callaway*
¿Cómo influye la pérdida de hábitat en la extinción de especies? *Por Joaquín Hortal y Ana M. C. Santos*

46 De cerca
Un mono aullador con leucismo. *Por J. Carlos Serio Silva, Jorge Ramos Luna y M. Fernanda Álvarez Velázquez*

48 Historia de la ciencia
Galileo en tiempos de epidemia. *Por Hannah Marcus*

51 Foro científico
Frenemos la sexta extinción *Por Gerardo Ceballos*

84 Taller y laboratorio
Cultivo de supercristales a gran velocidad: el ejemplo de la hoganita. *Por Marc Boada*

88 Juegos matemáticos
La hipótesis de Riemann (III). *Por Bartolo Luque*

92 Libros
El contagio en un mundo hiperconectado. *Por Vicente Soriano*
El reciclaje no es como nos lo habían contado. *Por Fernando T. Maestre*

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA

Los astrónomos pensaban que la masa de una estrella determinaba por completo la manera en que moriría, pero en los últimos años han observado una serie de explosiones estelares atípicas que desafían este supuesto. El estudio de tales supernovas extremas podría servir para responder algunas cuestiones fundamentales sobre la vida y la muerte de las estrellas. Ilustración de Kenn Brown, Mondolithic Studios.



redaccion@investigacionyciencia.es



Julio y diciembre de 2020

VIVIR CON ALZHÉIMER

Un importante hilo conductor del informe especial «Una nueva era para el Alzheimer» [Investigación y Ciencia, julio de 2020] es el potencial impacto del estilo de vida en el riesgo de sufrir demencia o deterioro cognitivo.

Tres países europeos (Finlandia, Francia y los Países Bajos) han completado ensayos pioneros de prevención de demencia en personas mayores. En ellos se demuestra que es posible reducir el riesgo de deterioro cognitivo en adultos de edad avanzada mediante una intervención que afecte a varios ámbitos del estilo de vida. Y en 2018, el estudio SPRINT MIND refirió reducciones significativas en el riesgo de deterioro cognitivo leve y en la combinación de este y demencia si se aminoraba de manera sustancial la presión arterial sistólica.

En estos momentos, el estudio U.S. POINTER de la Asociación de Alzheimer de EE.UU., orientado a estudiar la prevención del deterioro cognitivo mediante cambios en el estilo de vida, está reclutando participantes. Durante dos años, este ensayo clínico evaluará si los cambios en el modo de vida pueden proteger la función cognitiva en aquellos adultos mayores que sufren un mayor riesgo de deterioro cognitivo.

Esta línea de investigación presenta esperanzadoras posibilidades para prevenir tanto el alzhéimer como otras demencias, como muestra su inclusión actual en el tratamiento y prevención de las enfermedades cardíacas. Nuestra asociación y sus colaboradores agradecen la cobertura dedicada en el informe especial a los avances científicos en el estudio de esta enfermedad.

María C. Carrillo
Directora científica de la Asociación de Alzheimer de EE.UU.

VISITANTES INTERESTELARES

En «Intrusos interestelares» [Investigación y Ciencia, diciembre de 2020], David Jewitt y Amaya Moro-Martín explican que la forma de 1I/'Oumuamua, el primer objeto interestelar jamás observado, fue inferida a partir de su curva de luz; es decir, la manera en que variaba la cantidad de luz solar que el objeto reflejaba hacia la Tierra. Sin embargo, ¿no podría esa misma curva de luz haber sido producida por un objeto más redondeado pero con un albedo no uniforme? ¿Existen mecanismos conocidos o hipotéticos que puedan causar que un asteroide refleje mucha más luz de un lado que de otro?

Maritn Schulman
Herndon, Virginia

El artículo de Jewitt y Moro-Martín me ha recordado al relato de ciencia ficción *Estrella de neutrones*, escrito por Larry Niven en 1966. ¿Han considerado los astrónomos las fuerzas de marea como posible explicación para la forma alargada de 'Oumuamua? ¿Podría este haberse convertido en plástico debido al calor de un encuentro cercano con un objeto gravitacionalmente denso, para, después, pasar lo suficientemente cerca de un cuerpo como una estrella de neutrones y adquirir su forma alargada debido a las intensas fuerzas de marea?

Dan Graifer
Fairfax, Virginia

Responden los autores: *La idea sugerida por Schulman es posible; pero, si nos basamos en las observaciones de miles de asteroides del sistema solar, creemos que es poco probable. Aunque un asteroide puede presentar pequeñas diferencias de albedo, estas son por lo general variaciones de unos pocos puntos porcentuales, no del 1000 por cien. Solo Jápeto, la luna de Saturno, presenta albedos muy diferentes en un lado y otro, pero se trata de un caso muy especial y probablemente causado por la contaminación procedente de otra luna, la cual solo incide en un lado del objeto. En el espacio interestelar, todos los lados de 'Oumuamua estarían bañados de manera uniforme por la luz de las estrellas y por los rayos cósmicos, por lo que cualquier asimetría resultaría difícil de explicar.*

Curiosamente, una idea similar a la de Graifer fue propuesta por los investigadores Yun Zhang y Douglas N. C. Lin en el número de septiembre de 2020 de Nature Astronomy. *Su trabajo postulaba que un planeta que pasara cerca de una estrella densa podría ser estirado y desmenuzado en pedazos, uno de los cuales se habría convertido en 'Oumuamua. Esta posibilidad requería que el planeta se aproximase lo suficiente a la estrella, pero no tanto como para vaporizar todo el hielo de agua, el cual sería necesario para suministrar la aceleración no gravitacional detectada en 'Oumuamua. Al igual que ocurre con todas las propuestas especulativas de este tipo, la pregunta es: ¿cómo podemos ponerla a prueba?*

Errata corrige

Como nos informa nuestro lector Miquel Lleonart, el autor del artículo «El efecto Casimir», citado en la bibliografía de **¿Cuánto vale la suma de todos los números naturales?** [por Bartolo Luque, Investigación y Ciencia; octubre de 2020], no es Eduardo Elizalde, sino Emilio Elizalde.

Como advierte nuestro lector Lambert Torres, en el artículo **La hipótesis de Riemann (I)** [por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, diciembre de 2020], la mención al máximo común divisor y el mínimo común múltiplo omite que estas cantidades son siempre relativas a dos o más números.

Estos errores han sido corregidos en la edición digital de los artículos correspondientes.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes


Las técnicas termosolares podrían abaratar la potabilización de aguas marinas y subterráneas.



WARREN KEELAN

TECNOLOGÍA

Agua solar

Varias técnicas emplean el calor del sol para eliminar la sal y los contaminantes del agua

En un mundo cada vez más cálido y poblado, el agua limpia se está tornando un bien muy preciado. Hacia el año 2025, dos tercios de los habitantes del planeta tendrán problemas para acceder al agua dulce, y retirar la sal y los contaminantes de las aguas subterráneas y oceánicas ofrece una vía para saciar la sed de la humanidad.

Sin embargo, levantar una gran planta desalinizadora cuesta millones de euros. La mayoría de ellas emplean la ósmosis inversa, una técnica que fuerza el paso del agua de mar a través de membranas semipermeables que retienen la sal. Pero este proceso deja residuos repletos de sal y compuestos químicos que pueden dañar los ecosistemas locales, y requiere mucha electricidad —el consumo eléctrico supone hasta la mitad de los costes de operación de una planta—, que además suele provenir de combustibles fósiles. Aunque ha habido intentos (sobre todo en Oriente Medio, Asia y África) por implementar paneles solares, esa opción también es costosa y no aborda el problema de los vertidos contaminantes.

Por ello, los científicos buscan una manera más directa de usar el calor del sol para eliminar la sal y otros contaminantes. La opción más simple es dejar que el agua se evapore y condensar el vapor para obtener agua pura. La humanidad lleva cientos de años aplicando distintas versiones de esta técnica, denominada destilación solar. Y ahora, en Arabia Saudí, los ingenieros pretenden construir una planta con enormes espejos que concentrarían la luz solar y sobrecalentarían el agua contenida en una cúpula de acero y vidrio de más de 50 metros de diámetro.

Pero los investigadores también emplean materiales y diseños innovadores para tratar de hacer el proceso

más barato, simple y transportable, de modo que todo el mundo pueda acceder a desalinizadores de calidad. «Los países en vías de desarrollo tienen enormes necesidades de agua potable», señala Naomi Halas, ingeniera informática y eléctrica de la Universidad Rice. «Las técnicas termosolares deberían reducir el gasto energético de la desalinización y permitir que se lleve a cabo en lugares remotos sin acceso a la red eléctrica.»

El Departamento de Energía (DOE) de EE.UU. anunciará en breve los semifinalistas de su Premio de Desalinización Solar. El objetivo es obtener un sistema que produzca 1000 litros de agua limpia por 1,5 dólares. «Ninguna técnica actual puede procesar agua de alta salinidad a ese precio», asegura Qilin Li, ingeniera civil y ambiental de Rice.

Dichos sistemas podrían superar un gran inconveniente de la ósmosis inversa: normalmente desaliniza solo la mitad del agua, y la solución restante va acumulando sal hasta terminar obstruyendo la membrana, detalla Craig Turchi, del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) del DOE. Ese subproducto nocivo, denominado salmuera, suele verterse al océano o inyectarse bajo tierra. Los sistemas termosolares son capaces de purificar agua con concentraciones salinas que (como mínimo) duplican la del mar, así que podrían procesar salmueras procedentes de plantas de ósmosis inversa, así como diversos residuos industriales y agrícolas que no son aptos para la ósmosis inversa, señala Meghan Hughes, portavoz del NREL. «En general, las técnicas térmicas como las que intentamos desarrollar mediante este programa son las únicas que pueden tratar las salmueras altamente concentradas.»

Li, Halas y sus colaboradores han construido un dispositivo de desalinización solar con una membrana de plástico porosa que permite el paso del vapor de agua, pero no el del líquido. Una cara está recubierta con pequeñas partículas de carbono que se calientan con el sol y vaporizan el agua salada que entra en contacto con ellas. El vapor atraviesa la membrana y se condensa en agua pura al otro lado. Hace poco, el grupo de Halas ha aumentado la eficiencia del sistema en un 50 por ciento al usar lentes de plástico para enfocar la luz del sol en la membrana, lo que genera más calor.

Según los cálculos de ese equipo de investigadores, en unos años deberían poder alcanzar el coste propuesto por el DOE, con un dispositivo de un metro cuadrado que produjese hasta 20 litros de agua por hora. «De momento tenemos un Ford T, aún no hemos llegado al Mustang», compara Halas. «Pero es lo bastante bueno para haber empezado a despertar interés comercial.»

En la Universidad de California en Los Ángeles, el grupo del ingeniero civil y ambiental David Jassby ha integrado en la membrana de un dispositivo similar materiales que conducen el calor. Bajo la membrana, los investigadores añadieron una fina malla de aluminio que se calienta con la luz del sol. «Eso permite enrollar la membrana en módulos espirales, puesto que no es necesario tener una gran superficie directamente expuesta al sol», apunta. En experimentos realizados en azoteas, el dispositivo produjo ocho litros de agua dulce por metro cuadrado de membrana y por hora.

SALUD

Aneurisma en una placa

Se opera un modelo impreso en 3D de esta alteración vascular

Los aneurismas cerebrales afectan hasta a una de cada 50 personas y ocurren cuando la pared debilitada de un vaso sanguíneo se dilata, como preámbulo a una ruptura que puede devenir mortal. Ahora se ha logrado crear en el laboratorio un modelo de aneurisma impreso en tres dimensiones que se puede «operar» insertando en su interior un artefacto que lo obstruye (obliteración) y evita su estallido. Este tipo de modelos se prestan a la personalización, pues permiten copiar el vaso sanguíneo afectado de un paciente real, de modo que el equipo médico puede probar tratamientos y hallar la mejor solución.

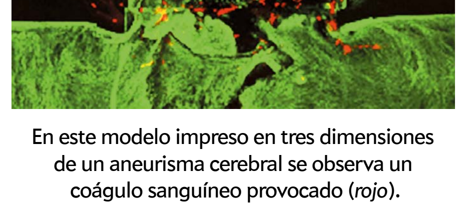
Como tratamiento, los neurocirujanos a veces optan por implantar una grapa metálica en el vaso dilatado para impedir la acumulación de la sangre. Otro método menos incruento consiste en insertar diminutos muelles metálicos a través de un catéter para provocar un coágulo sanguíneo que obstruya el aneurisma. La mayoría de los dispositivos han sido probados en animales, cuyos vasos no son idénticos del todo a los humanos. Y los aneurismas de laboratorio precedentes no reproducían las propiedades de los vasos sanguíneos vivos. «Pensamos que debía haber otro modo de poner a prueba esos dispositivos», afirma Lindy Jang, ingeniero biomédico de la Universidad A&M de Texas, que encabezó el novedoso estudio, publicado en *Biofabrication*.

Jang y sus colaboradores imprimieron en 3D un aneurisma con hidrogel y lo sembraron con las células humanas que tapizan el interior de los vasos sanguíneos cerebrales. A continuación operaron el aneurisma inyectando espirales de platino en el vaso dilatado. Por último, lo llenaron con plasma (la fracción líquida de la sangre), que formó un coágulo para sellar el abultamiento.

«Pretendemos simplificar el tratamiento de los aneurismas y acabar con las conjeturas», afirma William Hynes, coautor del estudio e ingeniero en biofabricación del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore de EE.UU., quien practicó la intervención quirúrgica simulada. «El objetivo es usar esos dispositivos para validar los modelos, de modo que uno pueda obtener una imagen tridimensional, crear un modelo manipulable del mismo e irrigarlo con sangre para averiguar si es preciso operar el aneurisma o es mejor dejarlo estar.»

«Creo que es muy importante», sostiene sobre el nuevo modelo Matthew Gounis, ingeniero biomédico en la Facultad de Medicina de la Universidad de Massachusetts. Otros grupos han concebido modelos de aneurisma, pero este es interesante porque incorpora células vivas e imita mejor un vaso sanguíneo, aclara Gounis, que opina como mero observador. Los cirujanos podrán practicar con modelos así antes de la intervención real. «Si se presenta un caso especialmente difícil, se podrá imprimir y practicar antes de entrar en el quirófano», añade.

—Tanya Lewis



En este modelo impreso en tres dimensiones de un aneurisma cerebral se observa un coágulo sanguíneo provocado (*rojo*).

ELISA WASSON, LAWRENCE LIVERMORE LABORATORY

Ese tipo de sistemas podrían dar lugar a aparatos compactos, apropiados para aldeas sin suministro eléctrico de Asia y África, comunidades con aguas subterráneas salobres del suroeste de Estados Unidos y usos de emergencia en casi cualquier sitio. Sin embargo, necesitarán convertir una mayor cantidad de energía solar en vapor, afirma Lenan Zhang, que estudia un doctorado en el laboratorio de la ingeniera mecánica Evelyn Wang, del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

El equipo de Wang consigue aumentar la eficiencia de su dispositivo «reutilizando la energía una y otra vez», explica Zhang. Se trata de una pila de 10 estructuras de nailon, cada una de las cuales cuenta con una capa negra que absorbe la radiación solar, papel absorbente y una lámina de aluminio. A medida que el agua salada va impregnando el papel, la capa negra la evapora, y el vapor se condensa en el aluminio. El calor liberado en la condensación se transfiere a la siguiente estructura y contribuye a la evaporación, en vez de perderse. El aparato, que cuesta menos de 100 euros, produce casi seis litros por hora en el laboratorio y la mitad al aire libre. Según Zhang, la eficiencia podría duplicarse empleando materiales más elaborados y un mayor número de niveles.

«Las técnicas termosolares deberían reducir el gasto energético de la desalinización y permitir que se lleve a cabo en lugares remotos sin acceso a la red eléctrica»

—Naomi Halas, Universidad Rice

Otro enfoque interesante consiste en hacer pasar aire a través del agua salada. «El aire absorbe el agua y deja las sales sólidas», explica Bahman Abbasi, ingeniero mecánico de la Universidad Estatal de Oregón. Su sistema emplea la radiación solar para calentar aire y generar chorros que pulverizan el agua salada. Ese aerosol se evapora, y se crea un vórtice que empuja las sales y otros sólidos hacia las paredes del aparato, mientras el aire humidificado asciende para ser condensado. El dispositivo tiene el tamaño de una mochila, y Abbasi afirma que es capaz de purificar agua con una salinidad hasta tres veces mayor que la del mar y producir unos 20 litros por hora.

Todas estas técnicas relativamente baratas podrían abrir nuevos mercados para purificadores de agua portátiles o nuevos usos independientes de la red eléctrica. Con el tiempo, podrían dar lugar a sistemas termosolares a gran escala que abastezcan de agua potable a las ciudades, vaticina Turchi. Por el momento, «servirán de complemento a la ósmosis inversa y desempeñarán un papel importante en aplicaciones específicas donde la ósmosis inversa no es viable».

—Prachi Patel

BIOQUÍMICA

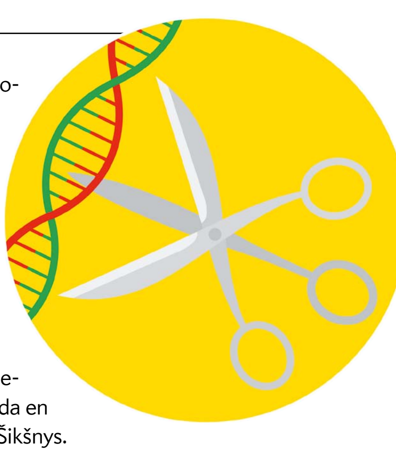
Tijeras de ADN

Un catálogo de proteínas Cas9 podría ampliar las opciones para la edición génica

El sistema CRISPR-Cas9 de edición del ADN está revolucionando el modo en que los científicos abordan los problemas y las enfermedades de carácter genético. Para modificar el ADN, la mayoría de los investigadores recurre a una versión concreta de la proteína Cas9, una derivada de la bacteria *Streptococcus pyogenes*. Pero otros microbios poseen sus versiones propias, que cortan los genes por lugares distintos y que podrían servir para diseñar tratamientos más precisos y flexibles. En un nuevo estudio publicado en *Nature Communications* se da a conocer el análisis de docenas de variantes de Cas9, lo que pone de manifiesto la amplia diversidad en el modo en que esas «tijeras moleculares» reconocen y recortan el ADN.

Para cortar el material genético, la Cas9 precisa una molécula de ARN «guía» que la dirija hacia una secuencia específica de ADN, y esa secuencia debe estar rematada por una corta hebra de ADN llamada motivo protoespaciador adyacente (PAM). La Cas9 solo puede cortar el ADN en los lugares en que su PAM particular existe de antemano. Este requisito estricto limita los puntos por donde es posible editar los genes, explica el bioquímico y autor principal del estudio Virginijus Šikšnys, de la Universidad de Vilna.

Para ampliar las opciones, explica Šikšnys, los biólogos escrutaron «miles de secuencias de proteínas Cas9 guardadas en las bases de datos» hasta seleccionar 79 candidatas de distintas bacterias. Sintetizaron cada una de esas Cas9 en un líquido que simulaba el medio interno de la célula y después añadieron a cada mezcla pequeños segmentos de ADN dotados con secuencias aleatorias de PAM.



THOMAS FUCHS

La mayoría de las Cas9 acabaron reconociendo una única secuencia PAM, característica esta que podría permitir a los bioingenieros cortar el ADN en más lugares, explica Patrick Pausch, investigador de CRISPR en la Universidad de California en Berkeley, ajeno al estudio. Los diversos tamaños de las proteínas (una procedente de un microbio extremófilo de los géiseres de Yellowstone, era un 30 por ciento más pequeño de lo habitual) facilitarían su cabida en diferentes sistemas de inserción, añade Šikšnys.

Y, con más opciones de Cas9, es posible eludir con más facilidad las respuestas inmunitarias adversas a ciertos tratamientos basados en la edición de genes. Un estudio precedente halló que el 58 por ciento de un grupo de 125 donantes de sangre presentaba anticuerpos contra la Cas9 de *S. pyogenes*. Las proteínas Cas9 derivadas de bacterias más inofensivas quizá tiendan menos a desencadenar una reacción perjudicial.

«Creo que la caracterización de esa enorme gama de proteínas supone una aportación meritoria a la comunidad», afirma Dipali Sashital, bioquímico de la Universidad Estatal de Iowa que no ha intervenido en el estudio. Sostiene que existe potencial para nuevas herramientas, pero subraya que el trabajo solo es preliminar; el equipo todavía no ha podido demostrar que las proteínas funcionen realmente en la edición génica.

El próximo paso consistirá en probar algunas de esas proteínas en organismos vivos. Sea cual sea su eficacia, esta extensa colección ilustra la gran diversidad de herramientas de corte del ADN. En palabras de Šikšnys: «Es como tener a tu disposición muchas tijeras en lugar de un solo par».

—Niko McCarthy

COGNICIÓN ANIMAL

Las patas autónomas de los arácnidos

Las habilidades tejedoras de las arañas podrían inspirar nuevas aplicaciones robóticas

Las patas de las arañas parecen pensar por sí mismas. Según los resultados de una investigación publicados en *Journal of the Royal Society Interface*, cada extremidad actúa como un «ordenador» semiautónomo, con sensores que captan e interpretan el entorno inmediato e inician los movimientos en consecuencia. Tal autonomía ayuda a los arácnidos a tejer con rapidez telas perfectas, con un mínimo empeño del cerebro. Los autores del estudio simularon reglas sorprendentemente simples que rigen este comportamiento complejo, que podrían acabar siendo aplicables en el campo de la robótica.

«Lo novedoso del artículo reside en que sienta un paradigma interesante y posiblemente importante de cara al estudio y ensayo de nuevas ideas para la próxima generación de robots», afirma Fritz Vollrath, biólogo de la Universidad de Oxford y autor principal del artículo. «El comportamiento que demuestra la araña cuando teje la tela es un ejemplo perfecto para estudiar ese tipo de cuestiones en profundidad.»

El estudio gira en torno a la «computación morfológica», la idea de que una función puede estar codificada en una parte periférica del cuerpo, sin depender de las instrucciones del cerebro. Algunos ejemplos serían el reflejo rotuliano, que se desata al golpear por debajo de la rodilla, o el acto de caminar. «Básicamente se trata de un atajo, y ni el propio cerebro sabe qué está ocurriendo allí abajo», aclara Vollrath. Esta delegación de funciones le ahorra la necesidad de supervisar acciones corrientes perfeccionadas por la evolución o la práctica.



Incluso una araña con cuatro patas acortadas en un lado (*en la imagen*) es capaz de tejer una tela perfecta.

BIOLOGÍA

La visión infrarroja de las serpientes

Se examina el modo en que algunas serpientes «ven» en la oscuridad



Las víboras de foseta como esta poseen una visión térmica sumamente sensible.

Es sabido que algunos ofidios, como las víboras de fosetas y las pitones, cazan en la oscuridad al percibir el calor que irradia la presa. Pero ¿cómo convierten ese calor en imágenes térmicas que pueden «ver»? Un modelo propuesto por investigadores de la Universidad de Houston y la Universidad Rutgers plantea una posible respuesta. Su artículo, publicado en *Matter*, también podría ayudar a elaborar materiales artificiales blandos que transformen el calor en electricidad para aplicaciones como sensores o captadores de energía.

La foseta loreal, una pequeña cavidad cubierta por una membrana delgada y situada cerca de los orificios nasales de la serpiente, parece actuar como un «ojo» térmico. Dotada de una sensibilidad extraordinaria, con ella es capaz de percibir un animal a unos 40 centímetros de distancia en menos de 50 centésimas de segundo en la oscuridad más cerrada. Los biólogos ya habían identificado, en las fibras nerviosas de la membrana, canales iónicos que se activan con los cambios de temperatura. Y también sabían que esta membrana se calienta con suma rapidez. Pero

DE «SPIDER WEBS INSPIRING SOFT ROBOTICS», FRITZ VOLLRATH Y THIEMO KRINK, EN *JOURNAL OF THE ROYAL SOCIETY INTERFACE*, 11 DE NOVIEMBRE DE 2020 (HTTPS://DOI.ORG/10.1098/RSIF.2020.0569) (*araña*); JONNE SEIJDEL, GETTY IMAGES (*víbora*)

Los expertos en robótica han fijado su mirada en la computación morfológica por la misma razón: economiza potencia y tiempo de cómputo. Pero pocos estudios hasta la fecha habían examinado con detenimiento el fenómeno en la naturaleza. Según Vollrath, las arañas son ideales para un experimento que contribuya a llenar esa laguna, no solo por lo fácil que es ver los cambios de trazado en sus redes geométricas, sino porque sus patas se regeneran cuando se quiebran.

Él y el otro autor, el informático de la Universidad de Aarhus Thiemo Krink, filmaron y digitalizaron los movimientos de varias arañas de jardín (*Araneus diadematus*). Pese a que todas tenían algunas patas de posiciones concretas parcialmente regeneradas hasta la mitad de su longitud, tejieron su red con la misma rapidez y perfección que otras cuyas extremidades permanecían intactas. Según los autores, si el cerebro hubiese tenido que computar el modo de compensar la escasa longitud de esas patas, se habrían observado retrasos mínimos pero medibles en la operación. En lugar de ello, en su estudio plantean que la pata de la araña recibe órdenes básicas del cerebro pero ajusta sus movimientos en función de las señales que afluyen desde los sensores locales, que adoptan la forma de pelos y hendiduras en la superficie del cuerpo.

Mediante la comparación de los movimientos de las patas largas y cortas también dedujeron reglas sobre el modo en que las patas se desplazan automáticamente para medir ángulos y longitudes durante la tejedura. Para someter a prueba esas reglas, programaron una araña virtual; Vollrath explica que el próximo paso será construir un autómata arácnido.

«Creo que se trata de un trabajo sumamente interesante, pues nos enseña más sobre las arañas y también sobre la computación morfológica», opina Cecilia Laschi, especialista en biorrobótica de la Escuela Superior Santa Ana de Pisa, que no ha participado en el estudio. «Nunca se sabe qué innovaciones notables puede depararnos la ciencia básica como la de este estudio.»

—Rachel Nuwer

---

hasta ahora no estaba claro de qué modo las variaciones térmicas captadas en la foseta acaban convirtiéndose en señales eléctricas que viajan hasta el cerebro.

«En la naturaleza existen materiales piroeléctricos que convierten el calor en electricidad, pero son raros y consisten en cristales duros; tales cristales no se han hallado en las serpientes», afirma Pradeep Sharma, ingeniero mecánico de la Universidad de Houston y uno de los firmantes del artículo. «Lo que hemos demostrado es que ciertos materiales blandos, como las células vivas, pueden actuar también como piroeléctricos débiles en circunstancias especiales.»

Sharma y su equipo han elaborado un modelo matemático que muestra cómo se moverían las cargas estáticas en un material deformable y termosensible. Modelizaron la membrana de la foseta como una película constituida por un material así, que se engrosaría al calentarse. La mayoría de las células biológicas, incluidas las que forman la membrana auténtica, generan de modo natural un pequeño voltaje eléctrico en su superficie externa. Los investigadores constataron que cuando el grosor de la membrana aumenta, las cargas de las células que la integran varían levemente y provocan un cambio de voltaje, que es captado por las neuronas.

A continuación, sometieron a prueba ese modelo teórico con valores reales y comprobaron que encajaba con la rapidez con que las serpientes detectan sus presas, así como con la distancia a la que la presa debe estar situada y la diferencia de temperatura necesaria entre el cuerpo de esta y el entorno.

Elena Gracheva, neurocientífica de la Universidad Yale que no participó en el estudio, había dado a conocer antes el cometido que los canales de iones desempeñan en la capacidad termosensorial de las serpientes. Según ella, esta nueva idea sobre la conversión de las señales «sienta las bases para futuros trabajos experimentales destinados a verificar el modelo».

En opinión de Sharma, también podría derivar en una nueva rama tecnológica. «Es posible aplicar el mismo modelo a la creación de materiales sintéticos dotados de propiedades piroeléctricas, que tendrían aplicaciones fascinantes en el campo de la ciencia de los materiales.»

—Harini Barath

OLFATO

Comienza a aclararse la misteriosa pérdida de olfato debida a la COVID-19

Empezamos a tener explicaciones moleculares para este síntoma irritante pero habitual

STEPHANI SUTHERLAND



GETTY IMAGES/ALDOMURILLO/ISTOCK

Un sábado de principios de abril del año pasado, mientras se bebía una infusión con hojas de menta fresca, Eian Kantor se dio cuenta de que había perdido el sentido del olfato. Lo sospechó al notar que el té no le olía a nada, así que rebuscó en la nevera para olisquear un bote de pepinillos, una salsa de pimiento chile y unos ajos. Pero nada.

Desde que a finales de marzo se confinara el estado de Nueva York, Kantor, de 30 años, y su novia habían permanecido aislados en su apartamento de Queens, en Nueva York. Así que ni sospechaba que pudiera tener la COVID-19 a pesar de una fiebre leve que achacaba a las alergias estacionales. Cuando consiguió hacerse la prueba semanas después de la pérdida del olfato (anosmia), dio negativo. Meses más tarde, otras pruebas indicaron que tenía los anticuerpos contra el nuevo coronavirus «disparatadamente altos, lo que confirmaba que había pasado la enfermedad».

Se estima que el 80 por ciento de las personas con COVID-19 presentan alteraciones del olfato, y que muchas también tienen disgeusia o ageusia (alteración o pérdida del gusto, respectivamente), o cambios en la quimioestesia (la capacidad para percibir las sustancias irritantes, como las guindillas). La pérdida del olfato es tan frecuente en las personas con COVID-19 que algunos investigadores han recomendado utilizarla como prueba diagnóstica, ya que podría ser un marcador más fiable que la fiebre u otros síntomas.

Sigue siendo un misterio la manera que tiene el nuevo coronavirus de privar a sus víctimas de estos sentidos. Al comienzo de la pandemia, los médicos y los investigadores estaban preocupados porque pensaban que la anosmia por COVID-19 indicaba que el virus se abría paso hacia el cerebro por la nariz, donde ocasionaría daños graves y duraderos. Se sospechaba que el camino pasaría por las neuronas olfativas, que perciben los olores en el aire y transmiten la señal al cerebro. Pero los estudios indican que probablemente no sea así, afirma Sandeep Robert Datta, neurocientífico de la Escuela de Medicina de Harvard. «Todos los datos hasta la fecha me hacen pensar que la invasión empieza realmente en la nariz, en el epitelio nasal», una capa de células semejante a la piel que se encarga de detectar los olores. «Parece que el virus prefiere atacar las células de sostén y las células madre, pero no a las neuronas directamente», nos comenta Datta, y puntualiza que esto no significa que las neuronas no se vean afectadas.

La superficie de las neuronas olfativas no presenta el receptor ACE2 (enzima con-

vertidora de la angiotensina 2) que usa el virus para entrar, mientras que las células sustentaculares, que dan un importante sostén por distintas vías a las neuronas olfativas, están salpicadas de ellos. Se trata de las células que mantienen el delicado equilibrio de iones salinos en el moco del que dependen las neuronas para enviar las señales al cerebro. Cualquier alteración de este equilibrio apagaría la señalización neuronal y con ella el olfato.

Las células sustentaculares también proporcionan el soporte metabólico y físico necesario para sostener los cilios que emiten las neuronas olfativas, donde se concentran los receptores que detectan los olores. Según Datta, «la alteración física de estos cilios hace perder el olfato».

Las pruebas disponibles

En un estudio de Nicolas Meunier, neurocientífico de la Universidad de París-Saclay, publicado en la revista *Brain, Behavior and Immunity*, se infectó el hocico de hámsteres dorados sirios con el SARS-CoV-2. En dos días, casi la mitad de las células sustentaculares estaban infectadas, pero no las neuronas olfativas, aunque hubieran transcurrido incluso dos semanas. Lo que sorprendió a Meunier fue que el epitelio olfativo estuviera completamente desprendido, como la piel que se despega tras una quemadura solar. Aunque no estuvieran infectadas las neuronas olfativas, los cilios habían desaparecido totalmente. «La ausencia de cilios conlleva la pérdida de los receptores olfativos y de la capacidad para detectar los aromas.»

La destrucción del epitelio olfativo podía explicar la pérdida de olfato. Sigue sin quedar claro si el daño lo hace el propio virus o la invasión de las células inmunitarias que Meunier observó después de la infección. La abundancia de notificaciones de anosmia por COVID-19 no se da en otras enfermedades víricas. «Creemos que es muy específica del SARS-CoV-2», afirma Meunier. En un estudio anterior de su laboratorio con otros virus respiratorios encontraron que las células sustentaculares no se solían infectar, mientras que con el SARS-CoV-2, casi la mitad contenían el patógeno. Con otros virus, el olfato suele verse comprometido por la congestión nasal, pero la COVID-19 no suele provocarla. Para Meunier, «es muy diferente».

Los investigadores dieron con unas pocas claves para la pérdida del olfato, pero el mecanismo por el que el virus provoca la pérdida del gusto está plagado de incertidumbres. Las células receptoras de los sabores detectan las sustancias químicas en la saliva y envían la señal al cerebro, pero, según un trabajo publicado el pasado julio, no contienen el ACE2, por lo que es poco probable que se infecten con el SARS-CoV-2. En cambio, otras células de sostén en la lengua sí llevan el receptor, lo que quizá proporcione alguna pista de la desaparición del gusto. Aunque parezca que el gusto desaparece con la anosmia debido a que los olores son un componente clave del sabor, muchas personas con COVID-19 desarrollan una ageusia verdadera y no saborean ni siquiera lo dulce ni lo salado.

Tampoco tenemos explicación, todavía, para la pérdida de la percepción de otros caracteres, como el picor de las guindillas o la sensación refrescante de la menta. Estas sensaciones no son sabores, sino que su detección la transmiten por el cuerpo (incluida la boca) los nervios que detectan el dolor, algunos de los cuales expresan el ACE2.

Quienes se recuperan de la anosmia son otra fuente de explicaciones para la pérdida del olfato debida al virus. Según Datta, «la mayoría de los pacientes pierden el olfato como si se apagara un interruptor, y lo recuperan igualmente rápido. Cuando la anosmia es mucho más persistente, la recuperación tarda más». El epitelio olfativo se regenera con regularidad. Meunier nos explica que «de esta forma se protege el cuerpo ante la continua avalancha de toxinas que le llegan desde el entorno».

Todavía hoy, más de siete meses después de que experimentase la anosmia por primera vez, Kantor forma parte del grupo de pacientes que sigue sin oler nada en absoluto. «Cuesta mucho, porque no eres consciente de cuánto necesitas el olfato hasta que lo pierdes. Si hubiera fuego en casa, no me enteraría. Me preocupa bastante.» Y, además, la anosmia le quita placer a la comida: «Mis alimentos preferidos ahora no me saben a nada».

Carol Yan, rinóloga de la Universidad de California en San Diego, dice que la anosmia supone un riesgo real para la salud. «Realmente incrementa la mortalidad porque si no hueles ni saboreas la comida, quedas expuesto a que te perjudiquen, por ejemplo, los alimentos podridos o una fuga de gas. También puede ocasionar un aislamiento social o deficiencias nutricionales.»

Las alteraciones sensitivas se extienden a otro síntoma denominado parosmia, un posible signo de recuperación en las personas con anosmia duradera. Es el caso de Freya Sawbridge, neozelandesa de 27 años que enfermó de COVID-19 en marzo del año pasado. Tras varias semanas con anosmia y ageusia, cuando todo le sabía a «cubitos de hielo y cartón», Sawbridge comenzó a recuperar los sabores más básicos (dulce, salado y amargo), pero ningún matiz gustativo procedente del aroma de los alimentos. «El chocolate me sabe como una goma dulce», nos comenta.

Al cabo de unos cinco meses recuperó algunos olores, pero no como esperaba: durante un tiempo, todas las comidas le olían a frambuesa artificial y ahora «todo tiene un olor atroz y distorsionado. Nada me huele como debería y los aromas me resultan desagradables». Para Sawbridge, el olor de las cebollas es insoportable, y un aroma artificial y extraño lo impregna todo. «Todas las comidas me saben como si las hubieran rociado con un limpiacristales.»

La parosmia podría aparecer cuando las células madre recién generadas que se diferencian en neuronas en la nariz intentan extender sus largas fibras, denominadas axones, por los agujeros diminutos de la base del cráneo para conectarse con la estructura encefálica denominada bulbo olfativo. A veces, los axones se conectan al lugar equivocado y provocan un olor errático, aunque dichas conexiones erróneas se suelen autocorregir al cabo de un tiempo suficiente.

Recuperación del olfato

Estas noticias son estupendas para las personas como Sawbridge. Pero la pregunta para la que quiere una respuesta se centra en cuánto le durará la anosmia. Según Yan, «no sabemos lo que tardará la recuperación de las personas con anosmia», pero lo normal está entre seis meses y un año. «Con la anosmia posvírica a largo plazo debida a la gripe, la probabilidad de recuperación espontánea al cabo de seis meses está entre el 30 y el 50 por ciento» sin ningún tratamiento. Y prosigue: «Se han descrito casos que se recuperan al cabo de dos años. Transcurrido este plazo, creemos que la capacidad regenerativa podría estar inhibida, así que, desgraciadamente, la posibilidad de recuperación sería muy remota».

Kantor ha intentado todo lo imaginable para recobrar el olfato: un tratamiento con corticoesteroides a grandes dosis para reducir la inflamación; un programa de

entrenamiento del olfato con aceites esenciales; suplementos con β-carotenos para la regeneración nerviosa; acupuntura... Nada ha marcado ninguna diferencia. Yan recomienda la «irrigación» de los senos nasales con budesonida, un corticoesteroide administrado por vía tópica que se ha demostrado que mejora los resultados en un estudio de la Universidad Stanford con los pacientes que perdieron el olfato durante más de seis meses después de una gripe. Otro tratamiento prometedor que Yan y sus colaboradores están investigando es el plasma rico en plaquetas, un preparado antiinflamatorio aislado de la sangre que se ha utilizado para tratar algunos tipos de lesiones nerviosas. Pero Yan indica que, independientemente del tratamiento, los resultados «no son sensacionales. Nadie se va a levantar notando que ya vuelve a oler. Pero si se vuelve a oler un jabón o a disfrutar del sabor de algunas comidas, se ha ganado mucho».

Y un apunte final preocupante sobre la anosmia: se ha determinado que es un factor de riesgo para algunas enfermedades neurodegenerativas. Nos informa Meunier que «después de la gripe pandémica de 1919 vimos un incremento de la prevalencia de la enfermedad de Parkinson. Sería realmente inquietante que ahora ocurriera algo parecido».

Pero Yan piensa que este temor es exagerado: «hay ciertamente una conexión entre la anosmia y las enfermedades, pero creemos que la anosmia inducida por virus transcurre por un mecanismo muy diferente. Que tengamos anosmia posvírica no implica que el riesgo para otras enfermedades sea mayor, porque son dos fenómenos completamente independientes». Esto debería tranquilizar a Sawbridge y Kantor, así como a los millones de personas en todo el mundo afectadas por la anosmia relacionada con la COVID-19.

Stephani Sutherland *es doctora en neurociencias y periodista científica.*

PARA SABER MÁS

COVID-19 and the chemical senses: Supporting players take center stage. Keiland W. Cooper et al. en *Neuron*, vol. 107, n.º 2, págs. 219-233, julio de 2020.
SARS-CoV-2 receptor ACE2 is enriched in a subpopulation of mouse tongue epithelial cells in nongustatory papillae but not in taste buds or embryonic oral epithelium. Zhonghou Wang et al. en *ACS Pharmacology Translational Science*, vol. 3, págs. 749-758, julio de 2020.
Massive transient damage of the olfactory epithelium associated with infection of sustentacular cellsby SARS-CoV-2 in golden Syrian hamsters. Bertrand Bryche et al. en *Brain, Behavior, and Immunity*, vol. 89, págs. 579-586, octubre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Anosmia. E. Von Bothmer en *MyC*, núm. 16, 2006.
La extraña mezcla de síntomas en la COVID-19: desde dolor de cabeza hasta lesiones dermatológicas en los pies. Diana Kwon en investigacionyciencia.es, 26 de mayo de 2020.

BIOLOGÍA

Inteligencia artificial y plegamiento de proteínas

El algoritmo AlphaFold ha logrado determinar las estructuras de algunas proteínas con tanta precisión como los experimentos, un hito que podría transformar la biología

EWEN CALLAWAY

Un sistema de inteligencia artificial (IA) desarrollado por DeepMind, la división de IA de Google, ha dado un paso de gigante hacia la resolución de uno de los mayores retos de la biología: determinar la forma tridimensional de una proteína a partir de su secuencia de aminoácidos.

El programa de DeepMind, denominado AlphaFold, superó a un centenar de equipos en un concurso bienal de predicción de estructuras proteínicas llamado CASP (Critical Assessment of Structure Prediction). Los resultados se anunciaron el 30 de noviembre del año pasado, al comienzo de la conferencia (en esta ocasión, virtual) en la que se hace balance del ejercicio.

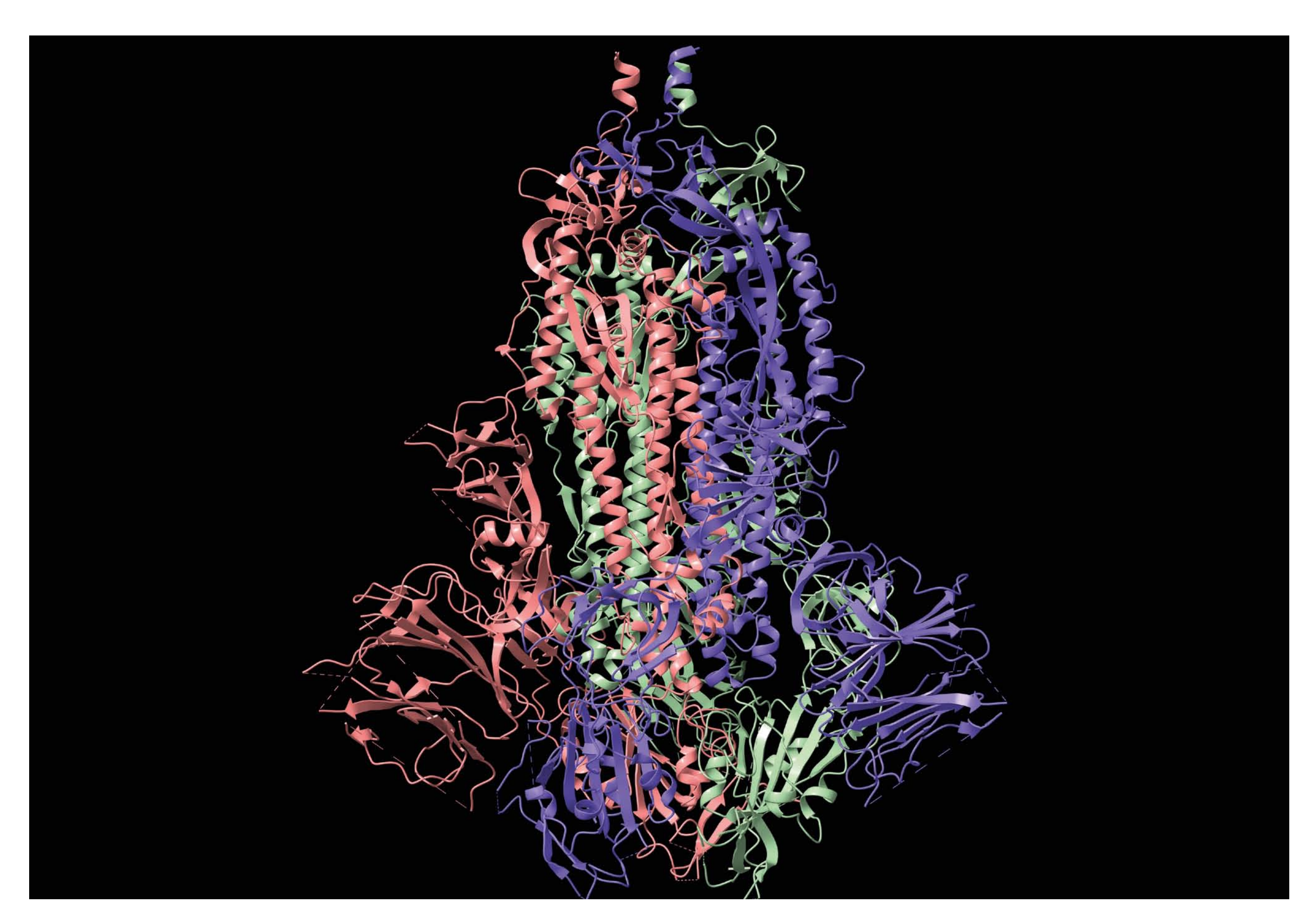
«Estamos ante algo importante», valora John Moult, biólogo computacional de la Universidad de Maryland en College Park y cofundador del CASP, un certamen que nació en 1994 para mejorar los métodos computacionales que tratan de predecir la estructura de las proteínas. «En cierto sentido, el problema está resuelto.»

Poder definir la estructura de una proteína a partir de su secuencia de aminoácidos supondría una bendición para las ciencias de la vida y la medicina, pues daría un gran impulso a nuestros esfuerzos por comprender los componentes básicos de las células y ayudaría a desarrollar fármacos más avanzados.

AlphaFold ya venció en la anterior edición del CASP, celebrada en 2018, que era la primera en la que participaba DeepMind. Pero en 2020 su algoritmo de aprendizaje profundo superó de manera holgada a los demás equipos y, según los científicos, obtuvo unos resultados tan increíbles que podrían anunciar una revolución en la biología.

«Es un punto de inflexión», asegura Andrei Lupas, biólogo evolutivo del Instituto Max Planck de Biología del Desarrollo de Tubinga, que evaluó el desempeño de los equipos que tomaron parte en el CASP. AlphaFold le ha ayudado a encontrar la estructura de una proteína que se le había resistido durante décadas. «Esto cambiará la medicina, la investigación, la bioingeniería. Lo cambiará todo», vaticina Lupas.

En algunos casos, las estructuras predichas por AlphaFold eran indistinguibles de las obtenidas con los métodos experimentales de referencia, como la cristalografía de rayos X y, en los últimos años, la criomicroscopía electrónica (crio-ME).



OBTENER la estructura tridimensional de las proteínas, como esta de la espícula del virus SARS-CoV-2, a partir de su secuencia de aminoácidos es uno de los grandes retos de la biología.

GETTY IMAGES/SERGUNT/ISTOCK

Puede que AlphaFold no permita —aún— prescindir de estos métodos laboriosos y caros, afirman los científicos, pero la IA ofrecerá nuevas maneras de estudiar los seres vivos.

El problema de la estructura

Las proteínas son los componentes básicos de la vida, y las responsables de la mayoría de lo que sucede en el interior de las células. Su forma tridimensional determina cómo actúan y cuál es su función, y las proteínas la adoptan sin ayuda, guiadas únicamente por las leyes de la física.

Durante décadas, los experimentos de laboratorio han constituido el principal método para dilucidar la estructura de las proteínas. Las primeras estructuras completas se hallaron a partir de la década de 1950, irradiando proteínas cristalizadas con haces de rayos X e infiriendo las coordenadas atómicas de la proteína a partir de la luz difractada. La mayoría de las estructuras proteínicas han llegado de la mano de esa técnica, la cristalografía de rayos X [*véase* «Aportaciones de la cristalografía a la medicina», por Juan A. Hermoso; Investigación y Ciencia, julio de 2014], pero en la última década la crio-ME se ha convertido en la herramienta favorita de muchos laboratorios de biología estructural [*véase* «Breve historia de la criomicroscopía electrónica», por Eva Nogales; Investigación y Ciencia, mayo de 2016].

Los investigadores se preguntan desde hace mucho cómo logran los aminoácidos de una proteína determinar todos y cada uno de los giros y pliegues que compondrán su forma final. Los primeros intentos de usar ordenadores para predecir las estructuras de las proteínas, realizados durante los años 80 y 90, no tuvieron demasiado éxito. Las esperanzas que despertaba cada nuevo método publicado se desvanecían en cuanto otros científicos trataban de aplicarlo a otras proteínas.

Moult instauró el CASP para dotar de rigor a esos intentos. En el concurso, los equipos deben predecir estructuras que ya se han determinado experimentalmente, pero que no son públicas.

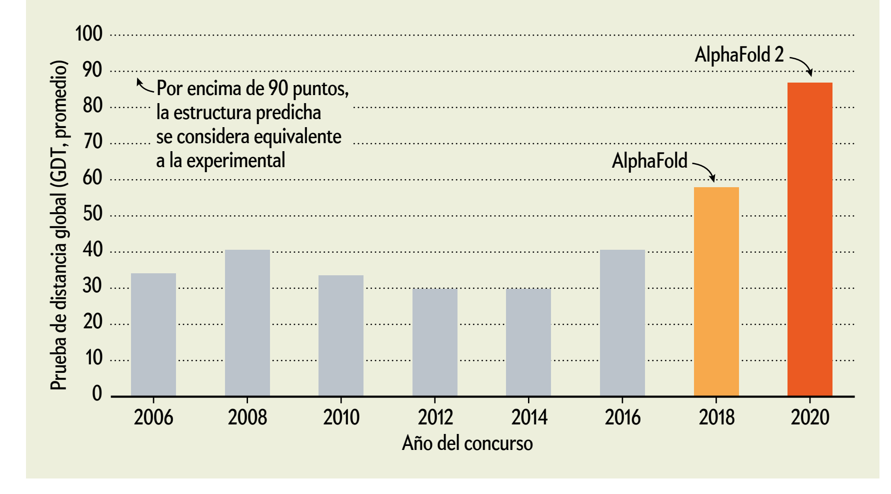
Los resultados que obtuvo DeepMind en el CASP13 de 2018 sorprendieron a muchos científicos de un campo que, durante largo tiempo, ha sido el baluarte de pequeños grupos académicos. Pero el enfoque de AlphaFold se parecía bastante a los del resto de equipos que usaron IA, apunta Jinbo Xu, biólogo computacional de la Universidad de Chicago.

Primero, AlphaFold aplicaba a datos estructurales y genéticos un método de IA denominado aprendizaje profundo para predecir la distancia entre los pares de aminoácidos de una proteína. En un segundo paso donde no intervenía la IA, AlphaFold usaba esa información para hallar un modelo «de consenso» sobre el aspecto que debía tener la proteína, detalla John Jumper, científico de DeepMind y líder del proyecto.

El equipo intentó perfeccionar ese enfoque, pero se topó con un obstáculo. Así que cambió de estrategia, prosigue Jumper, y desarrolló un sistema de IA que incorporaba información adicional sobre las restricciones físicas y geométricas que

DETERMINACIÓN DE ESTRUCTURAS

EL ALGORITMO ALPHAFOLD 2 DE DEEPMIND superó claramente al resto de equipos que participaron en el concurso CASP14 de plegamiento de proteínas, y también mejoró los resultados obtenidos por la primera versión del algoritmo en 2018. La gráfica muestra los resultados del equipo ganador en cada edición del CASP:



definen cómo se pliega una proteína. El equipo también le asignó una tarea más difícil: en vez de predecir las relaciones entre los aminoácidos, el programa trata de hallar la estructura final de la secuencia proteínica objetivo. «Se trata de un problema mucho más complejo», señala Jumper.

Precisión asombrosa

El CASP se celebra a lo largo de varios meses. Las proteínas o porciones de proteínas buscadas (unas 100 en total) se anuncian de manera periódica, y los equipos disponen de varias semanas para enviar sus predicciones. Un jurado de científicos independiente las evalúa, usando ciertos criterios para estimar cuánto se parece la estructura pronosticada a la determinada experimentalmente. Los evaluadores no saben quién está detrás de cada predicción.

Las predicciones de AlphaFold se ocultaban bajo el pseudónimo de «grupo 427», pero la increíble precisión de muchas de ellas hizo que no pasaran desapercibidas, admite Lupas. «Imaginé que se trataba de AlphaFold, y casi todos pensaron lo mismo», rememora.

Algunas predicciones eran mejores que otras, pero casi dos terceras partes eran equiparables en calidad a las estructuras experimentales. En algunos casos, destaca Moult, no estaba claro si la discrepancia entre AlphaFold y los resultados experimentales se debía a un error de predicción o a un artefacto del experimento. No obstante, AlphaFold tuvo más problemas a la hora de modelizar estructuras individuales en complejos proteínicos.

Estructuras más rápidas

Una predicción de AlphaFold ayudó a determinar la estructura de una proteína bacteriana que el laboratorio de Lupas llevaba años intentando caracterizar. El equipo de Lupas había reunido datos sin

Esto va a permitir que una nueva generación de biólogos moleculares se planteen cuestiones más avanzadas

procesar procedentes de la difracción de rayos X, pero para transformarlos en una estructura se precisa cierta información sobre la forma de la proteína. Todos sus intentos por obtener esta información habían fracasado, al igual que otras herramientas predictivas. «El modelo del grupo 427 nos dio la estructura en media hora», se admira Lupas.

Demis Hassabis, cofundador y director ejecutivo de DeepMind, explica que la compañía pretende que AlphaFold les resulte útil a los demás científicos. (En su día publicaron suficientes detalles sobre la primera versión de AlphaFold como para que otros investigadores pudieran reproducir su método.) AlphaFold puede tardar unos días en predecir una estructura, y también calcula la fiabilidad de distintas regiones de la proteína. «Apenas hemos empezando a entender qué es lo que buscan los biólogos», apunta Hassabis.

A principios de 2020, la compañía presentó predicciones para un puñado de estructuras de proteínas del SARS-CoV-2 que no se habían determinado en el laboratorio. Los pronósticos de DeepMind respecto a una proteína llamada Orf3a fueron similares a la estructura posteriormente hallada mediante crio-ME, afirma Stephen Brohawn, neurobiólogo molecular de la Universidad de California en Berkeley, cuyo equipo publicó la estructura en junio. «Lo que han logrado es muy impresionante», concede.

No es probable que AlphaFold elimine la necesidad de laboratorios como el de Brohawn, que emplean métodos experimentales para desvelar la estructura de las proteínas. Pero quizá haga posible determinar dicha estructura a partir de datos experimentales menos precisos. Algunas aplicaciones, como el análisis evolutivo de las proteínas, experimentarán un gran crecimiento. «Esto va a permitir que una nueva generación de biólogos moleculares se planteen cuestiones más avanzadas», concluye Lupas. «Habrá que pensar más y pipetear menos.»

Ewen Callaway *es periodista especializado en biomedicina en* Nature.

Artículo original publicado en *Nature* vol. 588, págs. 203-204, 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Improved protein structure prediction using potentials from deep learning. Andrew W. Senior et al. en *Nature*, vol. 577, pág. 706-710, enero de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Dinámica de las proteínas. Martin Karplus y J. A. McCammon en *IyC*, junio de 1986.

Aprendizaje profundo. Yoshua Bengio en *IyC*, agosto de 2016.

¿Por fin la inteligencia artificial? Ángel Garcimartín Montero en el blog *Materia Blanda*, 29 de diciembre de 2020.

FUENTE: DEEPMIND; © NATURE (*gráfico*)

ECOLOGÍA

¿Cómo influye la pérdida de hábitat en la extinción de especies?

Un análisis arroja nueva luz sobre esta cuestión largamente debatida. Los resultados tienen implicaciones en las estrategias de conservación

JOAQUÍN HORTAL Y ANA M. C. SANTOS



LA DESFORESTACIÓN Y LA TRANSFORMACIÓN DEL SUELO provocan la fragmentación del paisaje y la reducción del tamaño del hábitat de numerosas especies, cuya supervivencia puede verse amenazada.

GETTY IMAGES/PAVLIHA/ISTOCK

Saber cómo afecta el tamaño del hábitat a la abundancia de todas las especies que viven en él proporciona información muy útil a la hora de desarrollar estrategias que estimulen la biodiversidad. En un artículo publicado en *Nature*, Jonathan M. Chase, del Centro Alemán para la Investigación Integrada de la Biodiversidad (iDiv), en Leipzig, y sus colaboradores aportan resultados que pueden ayudarnos a resolver el antiguo debate sobre la relación entre la superficie de un hábitat y la diversidad de especies que puede albergar.

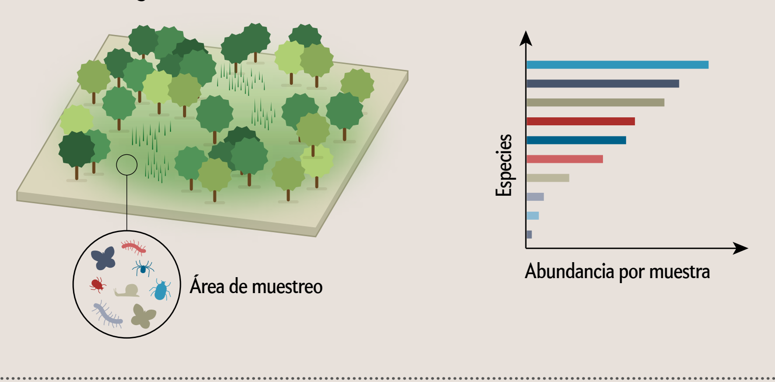
La transformación del suelo debida a la actividad humana es un elemento importante del cambio global. La pérdida de hábitats naturales reduce la diversidad local y la abundancia de especies, y ha estado implicada en más de un tercio de las extinciones animales producidas en todo el mundo en los últimos cuatro siglos. Un informe de la Plataforma Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) calcula que, en la actualidad, más de medio millón de especies (alrededor de un 9 por ciento de todas las terrestres) podrían carecer del hábitat suficiente para sobrevivir a largo plazo. Además, su desaparición comprometería muchos servicios ecosistémicos fundamentales, como la polinización y el control de plagas o microorganismos patógenos.

El efecto de la pérdida de hábitat sobre la biodiversidad se ha estimado, por regla general, sobre la base de la relación entre la superficie y la riqueza de especies. Esta relación sencilla y aparentemente universal, descrita hace más de 150 años, determina que cuanto mayor sea la superficie de un hábitat, mayor número de especies contendrá. Existe un límite en el número de individuos de especies ecológicamente similares que pueden persistir en un área determinada debido a los recursos limitados que esta contiene. Por consiguiente, cuando un hábitat pierde

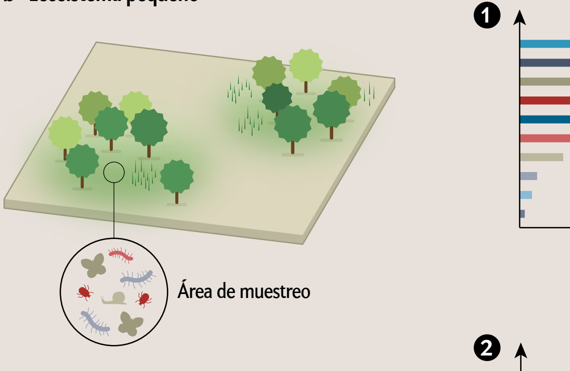
TAMAÑO DEL HÁBITAT Y BIODIVERSIDAD

COMPRENDER LA RELACIÓN EXISTENTE entre la reducción del área de un hábitat y su efecto sobre las especies es fundamental para el diseño de estrategias de conservación. Así se observa al comparar la diversidad de los organismos, como los insectos, en muestras obtenidas en ecosistemas grandes (*a*) con la de muestras tomadas en la misma zona pero en fragmentos más pequeños del mismo tipo de hábitat (*b*). Los gráficos ilustran los resultados hipotéticos de la abundancia de las especies por muestra, donde cada especie viene representada por un color. Se han distinguido tres posibles consecuencias a medida que el hábitat se va haciendo más pequeño.

***a* Ecosistema grande**



***b* Ecosistema pequeño**



1 Se mantiene la estructura de la comunidad

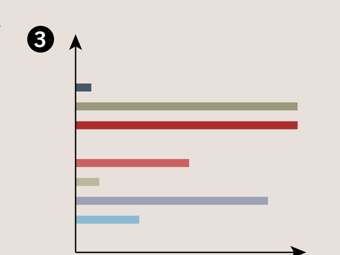
Las especies se distribuyen equitativamente en fragmentos del hábitat de cualquier tamaño, por lo que la riqueza, abundancia y prevalencia relativa de las especies por muestra es constante, independientemente del tamaño total del hábitat.

2 Se reduce el número de individuos de todas las especies

Las muestras de los fragmentos de menor tamaño poseen menos individuos y especies que las muestras de los fragmentos más grandes, y la abundancia de todas las especies se reduce de forma parecida cuando se pierde hábitat.

3 Se reduce el número de individuos de forma desigual

Las especies exhiben una respuesta diferente a la pérdida de hábitat y se produce un cambio en sus abundancias relativas. El reciente trabajo concluye que este es el modelo que mejor encaja con los datos observados.



parte de su extensión, ello significa, para numerosas especies, que también pierde la capacidad de mantener poblaciones lo bastante grandes como para ser viables. Al final, esas especies acabarán extinguiéndose.

Tres escenarios posibles

El reciente estudio del iDiv propone un enfoque elegante y sencillo para explicar la dinámica de las comunidades que ocupan fragmentos de hábitats de distinto tamaño. En lugar de tener en cuenta solo el número total de especies presentes en cada fragmento, los investigadores se centran también en su abundancia relativa. Ello permite la comparación directa de la estructura de las comunidades y, al mismo tiempo, evita posibles problemas derivados del muestreo de áreas de distinto tamaño.

Gracias a este método, los autores han definido tres tipos de cambios que podrían producirse a causa de la reducción del hábitat. En el descrito por el modelo de «muestreo pasivo», la estructura de la comunidad seguirá siendo la misma en los fragmentos grandes y pequeños. Por lo tanto, cada muestra proporcionará una riqueza de especies (número de especies), abundancia (número de individuos) y uniformidad (asignación de individuos a las diferentes especies) que serán parecidas, independientemente de cual sea el tamaño del hábitat. En este caso, la reducción de especies se corresponderá con la del hábitat, según la relación clásica entre especies y superficie antes mencionada, y el número total en todo el fragmento dependerá únicamente de su tamaño.

Los otros dos tipos de cambios han sido descritos como dos formas de degradación del ecosistema. Según este planteamiento, un hábitat cuyo tamaño vaya disminuyendo sufrirá una pérdida desproporcionadamente alta de organismos, mayor de lo que le correspondería por su menor superficie. En la primera forma de degradación, disminuirá el número de individuos de todas las especies. Las muestras de los fragmentos más pequeños contendrán menos individuos que las de los grandes, y todas las especies se verán afectadas por igual. Esto generará comunidades con menos especies en los fragmentos más pequeños, pero sin diferencias en la abundancia relativa de especies por muestra entre los fragmentos de mayor y menor tamaño.

La otra forma de degradación vendrá provocada por cambios desiguales en las

abundancias relativas de las especies a causa de la desaparición de algunas de ellas. En este escenario, las especies presentes responderán de manera diferente a la pérdida de hábitat y, por lo tanto, se volverán más o menos abundantes en los fragmentos pequeños que en los grandes. Su abundancia relativa se hará más dispar en las muestras de los fragmentos de menor tamaño a medida que algunas especies se vuelvan más dominantes, lo que provocará un empobrecimiento de la comunidad en número de especies.

Utilizando datos procedentes de 120 paisajes alterados por la actividad humana en todo el mundo, los autores revelan que, en general, las muestras de fragmentos pequeños tienen menos individuos, menos especies y una abundancia relativa de especies más desigual que las muestras tomadas en fragmentos de mayor tamaño. Este resultado es congruente con una degradación generalizada del ecosistema, principalmente como consecuencia de una reducción de la uniformidad, y es válido para cualquier tipo de hábitat u organismo estudiado. Significa que la alteración de los hábitats naturales provoca importantes cambios funcionales en la dinámica de los ecosistemas que van más allá de la simple pérdida de población y de especies. Por lo tanto, los cálculos actuales de las extinciones asociadas a la destrucción de hábitats basadas en el modelo de muestreo pasivo podrían subestimar no solo el número de especies que están en peligro de extinción o las ya extinguidas, sino también las consecuencias de su pérdida para el funcionamiento ecológico y la provisión de servicios ecosistémicos.

Especies ganadoras

Los cambios en la biodiversidad por la pérdida de hábitat alteran muchos procesos ecológicos, con posibles efectos catastróficos que aceleran el proceso de extinción. No obstante, las extinciones locales no suelen ser inmediatas. Algunas especies persisten con una menor abundancia y también con una dinámica poblacional menguante. Es lo que se conoce como «deuda de extinción», que dura hasta que desaparecen los últimos individuos. Esta provoca una distribución desigual de la abundancia de especies, que queda demostrada claramente por el método utilizado por Chase y sus colaboradores. Su análisis revela la existencia de unas pocas especies «ganadoras», que dominan la comunidad en hábitats pequeños, y de un gran número de especies poco comunes, muchas de las cuales están en camino de extinguirse.

Las especies que van desapareciendo pueden ser remplazadas por otras procedentes de los paisajes humanizados circundantes, en especial en los bordes del hábitat, lo que da lugar a «efectos de margen», que son comparativamente más importantes en los fragmentos pequeños. De hecho, en las primeras etapas de la transformación del suelo, las comunidades de los hábitats reducidos son más distintas de las comunidades inalteradas que de las correspondientes a los hábitats grandes; y se van pareciendo más a estas últimas con el paso del tiempo, a medida que se recuperan de la transformación.

Aunque este trabajo subraya el papel clave de la superficie del hábitat a la hora de mantener los procesos del ecosistema, se ha explorado poco cómo se ven alterados estos por la pérdida de hábitat. Las especies de los niveles tróficos superiores, como los depredadores, necesitan mayor superficie para mantener sus poblaciones que las de los niveles inferiores. Por consiguiente, el número de individuos en los fragmentos pequeños podría ser insuficiente para mantener las poblaciones de los depredadores superiores, y eso podría producir cadenas tróficas más cortas y alterar la estructura del ecosistema [*véase* «Las redes tróficas de la Antártida ante el cambio climático», por Tomás I. Marina, Vanesa A. Salinas y Georgina F. Cordone; Investigación y Ciencia, agosto de 2020]. Las diferencias en las tasas de extinción entre los niveles tróficos pueden provocar cambios sorprendentes en el funcionamiento del ecosistema en los bordes del hábitat, lo que puede poner en peligro la provisión de los servicios ecosistémicos a medida que los hábitats naturales disminuyen en tamaño.

Los resultados del reciente trabajo exigen una reconsideración del debate sobre si una única área grande dedicada a la conservación podría preservar más especies que varias zonas más pequeñas cuya superficie total alcanzase el mismo tamaño. Algunas pruebas actuales sugieren que un hábitat continuo podría albergar menos especies que muchas zonas de menor tamaño pero que sumasen la misma superficie. Sin embargo, los grandes cambios ecológicos que estos pequeños fragmentos pudieran sufrir podrían provocar reducciones masivas en la función del ecosistema y, en última instancia, un incremento en las tasas de extinción de las especies nativas a largo plazo, en comparación con el caso de una única área grande protegida.

El enfoque de los autores proporciona una buena visión general de la magnitud de estos efectos, pero para entender de forma exacta cómo están cambiando localmente los procesos ecológicos, es necesario un nivel superior de detalle. Esto requerirá ir más allá de los estudios de las cadenas alimentarias y evaluar redes tróficas más complejas, además de examinar los cambios en las respuestas funcionales de las especies y de la diversidad en hábitats cada vez más pequeños. Por último, esta información revelará los procesos ecológicos que se hallan en declive y las consecuencias de la degradación del ecosistema para el mantenimiento de una biodiversidad totalmente funcional.

Joaquín Hortal *es investigador del Departamento de Biogeografía y Cambio Global del Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC), en Madrid.*
Ana M. C. Santos *es profesora del Departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 584, págs. 194-196, 2020.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Landscape modification and habitat fragmentation: A synthesis. Joern Fischer y David B. Lindenmayer en *Global Ecology and Biogeography*, vol. 16, págs. 265-280, mayo de 2007.
Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. Tim Newbold et al. en *Nature*, vol. 520, págs. 45-50, abril de 2015.
The global assessment report on biodiversity and ecosystem services: Summary for policymakers. Sandra Díaz, et al. (eds.). IPBES, 2019.
Ecosystem decay exacerbates biodiversity loss with habitat loss. Jonathan M. Chase, et al. en *Nature*, vol. 584, págs. 238-243, julio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

La rareza de las especies. José M. Rey Benayas en *IyC*, mayo de 2009.



ASTRONOMÍA

SUPERNOVAS EXTREMAS

La mayoría de las estrellas mueren de formas predecibles, pero cada vez se conocen más supernovas extrañas que desafían las ideas tradicionales

Anna Y. Q. Ho

Ilustración de Kenn Brown, Mondolithic Studios

Anna Y. Q. Ho es investigadora posdoctoral en el Departamento de Astronomía de la Universidad de California en Berkeley. Estudia las muertes catastróficas de las estrellas masivas.



El 9 de septiembre de 2018, un telescopio robótico realizaba su observación rutinaria del cielo nocturno cuando detectó lo que parecía una nueva estrella. En pocas horas, la «estrella» se volvió 10 veces más brillante, lo que generó una alerta en un programa informático para detectar eventos celestes inusuales que yo misma había escrito. En California era de noche y yo dormía, pero mis colaboradores del otro lado del mundo reaccionaron enseguida al ver el aviso. Doce horas después, habíamos reunido suficientes datos de telescopios terrestres y espaciales para confirmar que se trataba de la explosión de una estrella —una supernova— en una galaxia lejana. Sin embargo, no era una supernova cualquiera.

Aunando los datos de distintos telescopios, concluimos que la estrella, tras brillar durante millones de años, había hecho algo sorprendente y misterioso: formó una envoltura a su alrededor al expulsar bruscamente capas de gas de su superficie. Unos días o una semana más tarde, la estrella explotó, y los escombros chocaron con la envoltura, provocando un destello de luz efímero y muy intenso. El cataclismo se produjo en una galaxia distante (la luz tardó casi mil millones de años en llegar a la Tierra), así que era demasiado tenue para apreciarlo a simple vista, pero lo bastante brillante para nuestros observatorios. Escudriñando datos telescópicos previos, logramos detectar la estrella en el momento en que se desprendía de los gases, dos semanas antes de estallar, cuando brillaba cien veces menos que la propia explosión.

Ese y otros hallazgos recientes han demostrado que las estrellas pueden morir de formas inesperadamente diversas. En ocasiones, el colapso del núcleo de una estrella masiva da lugar a un remanente estelar activo, el cual expulsa un chorro de material que viaja a velocidades ultrarrelativistas y que puede destruir el astro con más energía que una supernova normal. Otras veces, una estrella se despoja de buena parte de sus gases en una serie de erupciones violentas durante los últimos días o años de su vida. Estas muertes extremas no parecen frecuentes, pero el mero hecho de que ocurran revela que aún ignoramos muchos aspectos básicos sobre la vida y la muerte de las estrellas.

Mis colaboradores y yo estamos recopilando una colección de finales estelares exóticos que desafían los supuestos tradicionales. Empezamos a poder plantear y responder algunas preguntas fundamentales: ¿qué factores determinan cómo muere una estrella? ¿Por qué algunas estrellas terminan su vida con violentos chorros o erupciones, mientras que otras simplemente explotan?

UNA NUEVA ESTRELLA

La historia del nacimiento, vida y muerte de una estrella viene marcada por la competición entre dos fuerzas. Las estrellas se forman en nubes interestelares de hidrógeno gaseoso, cuando la gravedad que atrae una parte de la nube hacia dentro supera el empuje en sentido contrario de los campos magnéticos y las partículas de gas que se mueven a grandes velocidades. A medida que el fragmento de nube colapsa, su densidad aumenta 20 órdenes de magnitud y su temperatura sube millones de grados, hasta alcanzar valores lo bastante elevados para que los núcleos de hidrógeno choquen y se unan en núcleos de helio. Entonces comienza la fusión y nace una nueva estrella.

EN SÍNTESIS

Las recientes observaciones de algunas explosiones atípicas han demostrado que las estrellas pueden morir de formas más diversas de lo que se pensaba.

A veces, la estrella anuncia su muerte expulsando capas de gas poco antes de estallar. Otras, el objeto que se forma al colapsar el núcleo emite un chorro de materia que destruye la estrella con más energía que una supernova normal.

El estudio de estas y otras muertes extremas servirá para determinar si son distintas manifestaciones de un mismo fenómeno y para responder cuestiones fundamentales sobre la vida y muerte de las estrellas.

La propia estrella también es un campo de batalla, donde la gravedad tira hacia dentro y la presión de la fusión nuclear empuja hacia fuera. La evolución de una estrella depende de su temperatura, que a su vez depende de su masa. Cuanto más masivo es el astro, más pesados son los elementos que puede forjar y más rápido agota su combustible. Las estrellas más ligeras se limitan a fundir hidrógeno para producir helio: el Sol, por ejemplo, tiene más de 4000 millones de años y sigue consumiendo su hidrógeno. Las más pesadas viven mucho menos, tan solo unos 10 millones de años, pero fabrican una cadena de elementos mucho más larga: oxígeno, carbono, neón, nitrógeno, magnesio, silicio e incluso hierro.

La masa de una estrella también determina cómo morirá. Los astros con menos de unas ocho masas solares mueren de una forma relativamente tranquila: tras agotar sus reservas de combustible nuclear, expulsan sus capas exteriores al espacio y dan lugar a hermosas nebulosas planetarias. El núcleo de la estrella queda expuesto en forma de enana blanca, un objeto caliente y denso que acumula en torno a la mitad de la masa del Sol en un tamaño no mucho mayor que el de la Tierra.

Por contra, las estrellas más masivas se ven abocadas a un final violento debido a las enormes temperaturas y presiones de su núcleo. Cuando la combustión nuclear llega al hierro, la cadena de fusión se detiene y la estrella pierde su presión interna. La gravedad toma las riendas y el núcleo del astro colapsa hasta que sus átomos se encuentran tan próximos entre sí que comienza a intervenir otra fuerza opuesta: la fuerza nuclear fuerte. Para entonces, el núcleo se ha convertido en una estrella de neutrones, un estado exótico y denso de la materia compuesto sobre todo por neutrones. Si la estrella posee suficiente masa —más de 20 veces la del Sol—, la gravedad también se impone a la fuerza nuclear fuerte y la estrella de neutrones sigue colapsando hasta formar un agujero negro. De un modo u otro, una parte de la energía liberada durante el colapso del núcleo arroja las capas externas de la estrella al espacio en una explosión tan brillante que, durante unos días, eclipsa al conjunto de estrellas de esa galaxia.

La humanidad lleva miles de años distinguiendo supernovas a simple vista. En 1572, el astrónomo danés Tycho Brahe observó una nueva estrella en la constelación de Casiopea. El astro brillaba tanto como Venus y se mantuvo así durante meses antes de desvanecerse, dejando a Brahe tan asombrado que llegó a dudar de sus propios ojos. Los restos de esa explosión aún son visibles hoy en día y se conocen como el remanente de la supernova de Tycho.

Para que podamos apreciar una supernova a simple vista, debe hallarse en la Vía Láctea (como la supernova de Tycho) o en una de sus galaxias satélite, lo cual es poco frecuente: puede que en toda mi vida no llegue a ver una supernova sin la ayuda de un telescopio, aunque la esperanza es lo último que se pierde. El siglo pasado, los astrónomos comenzaron a utilizar telescopios para buscar supernovas más allá de la Vía Láctea, observando de manera repetida un mismo conjunto de galaxias en busca de cambios, los denominados fenómenos transitorios. Los telescopios actuales están robotizados y equipados con cámaras modernas, lo que nos permite descubrir miles de supernovas cada año.

Uno de los primeros indicios de que algunas estrellas sufrían muertes extremas fue el descubrimiento, en la década de 1960, de los estallidos de rayos gamma (GRB, por sus siglas en inglés), llamados así por las brillantes ráfagas de rayos gamma que emiten. Creemos que se observan cuando una estrella masiva colapsa para dar lugar a una estrella de neutrones o un agujero negro, el objeto compacto recién formado lanza un estrecho chorro de material que logra atravesar los restos de la estrella, y además resulta que el chorro apunta hacia la Tierra.

¿Cómo podría surgir ese chorro? La idea básica es la siguiente. Cuando una estrella normal se queda sin combustible y muere, su núcleo se derrumba y forma una estrella de neutrones o un agujero negro, y ahí acaba todo. En un GRB, sin embargo, el objeto compacto se mantiene activo. Puede que el incipiente agujero negro absorba masa de un disco de material circundante y despida energía en el proceso. O quizás la estrella de neutrones recién creada rota a gran velocidad y su intenso campo magnético actúa como un freno, liberando energía conforme se ralentiza el astro. En cualquier caso, ese «motor central» emite energía por medio de un chorro de plasma muy caliente que parte del centro de la estrella y atraviesa el material que cae, mientras brilla en rayos gamma.

Las muertes extremas no parecen frecuentes, pero el hecho de que ocurran revela que aún ignoramos muchos aspectos básicos sobre la vida y la muerte de las estrellas

El paso del chorro a través de la estrella hace que esta explote en una supernova de tipo Ic-BL, diez veces más energética que una supernova ordinaria. A medida que el chorro choca con el gas y el polvo circundantes, emite luz en todo el espectro electromagnético, un resplandor que se conoce como posluminiscencia o «rescoldo». Estos resplandores son 1000 veces más brillantes que las supernovas habituales, pero también son 100 veces más fugaces y desaparecen en unas pocas horas, por lo que no resulta fácil observarlos. La mejor estrategia consiste en esperar a que un satélite detecte un GRB y orientar enseguida el telescopio hacia el lugar donde se produjo.

Pero esperar a que un satélite identifique un estallido restringe la clase de fenómenos que podemos descubrir. Para que podamos observar un GRB, tienen que salir bien muchas cosas: el chorro de material debe generarse, atravesar toda la estrella y estar orientado hacia nosotros. De hecho, los GRB parecen eventos muy improbables: los fotones de rayos gamma que emite el chorro deberían quedar atrapados, a no ser que el chorro viaje al 99,995 por ciento de la velocidad de la luz. Y para alcanzar tales velocidades, el chorro tendría que cruzar la estrella sin arrastrar el material estelar. ¿Es posible que las estrellas frenen la mayor parte de los chorros y solo veamos la pequeña fracción

Continúa en la página 24

Supernovas sorprendentes

Durante mucho tiempo se pensó que la vida y la muerte de una estrella dependían casi en exclusiva de su masa **A**. Pero el hallazgo de supernovas extrañas a lo largo del pasado decenio, y sobre todo en los últimos años, ha revelado que la realidad es mucho más compleja. En ocasiones, el núcleo de una estrella moribunda se convierte en un motor que emite un potente chorro o un viento, y eso produce una explosión más energética de lo normal **B**. Otras veces, la estrella expulsa material antes de morir, anunciando su inminente explosión **C**.

A MODELO CLÁSICO

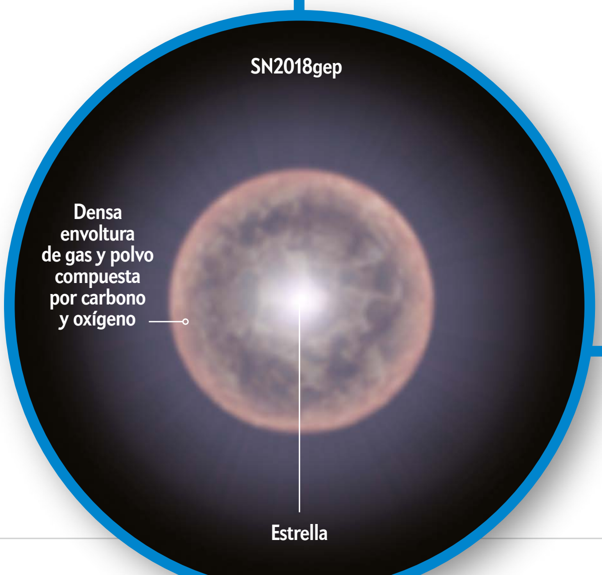
Tradicionalmente se pensaba que la masa de una estrella determinaba cómo moriría. Para distintos intervalos de masas estelares debían producirse diferentes tipos de supernovas, que dejarían diversos productos finales como remanente. Aunque esa idea sigue siendo válida en gran medida, a veces el proceso se separa del habitual y culmina de otras formas (*círculos verdes, naranjas, azules y amarillos*).

Masa de la estrella (masas solares)	Tipo de supernova	Remanente estelar
8–10	Captura de electrones	Estrella de neutrones
10–20	Colapso del núcleo de tipo II	Estrella de neutrones
20–40	Colapso del núcleo de tipo II	Agujero negro
40–100	Colapso del núcleo de tipo Ibc	Agujero negro
100–260	Inestabilidad de pares	Nada
Más de 260		Agujero negro

?

C RAREZA: PRESAGIOS FUNESTOS

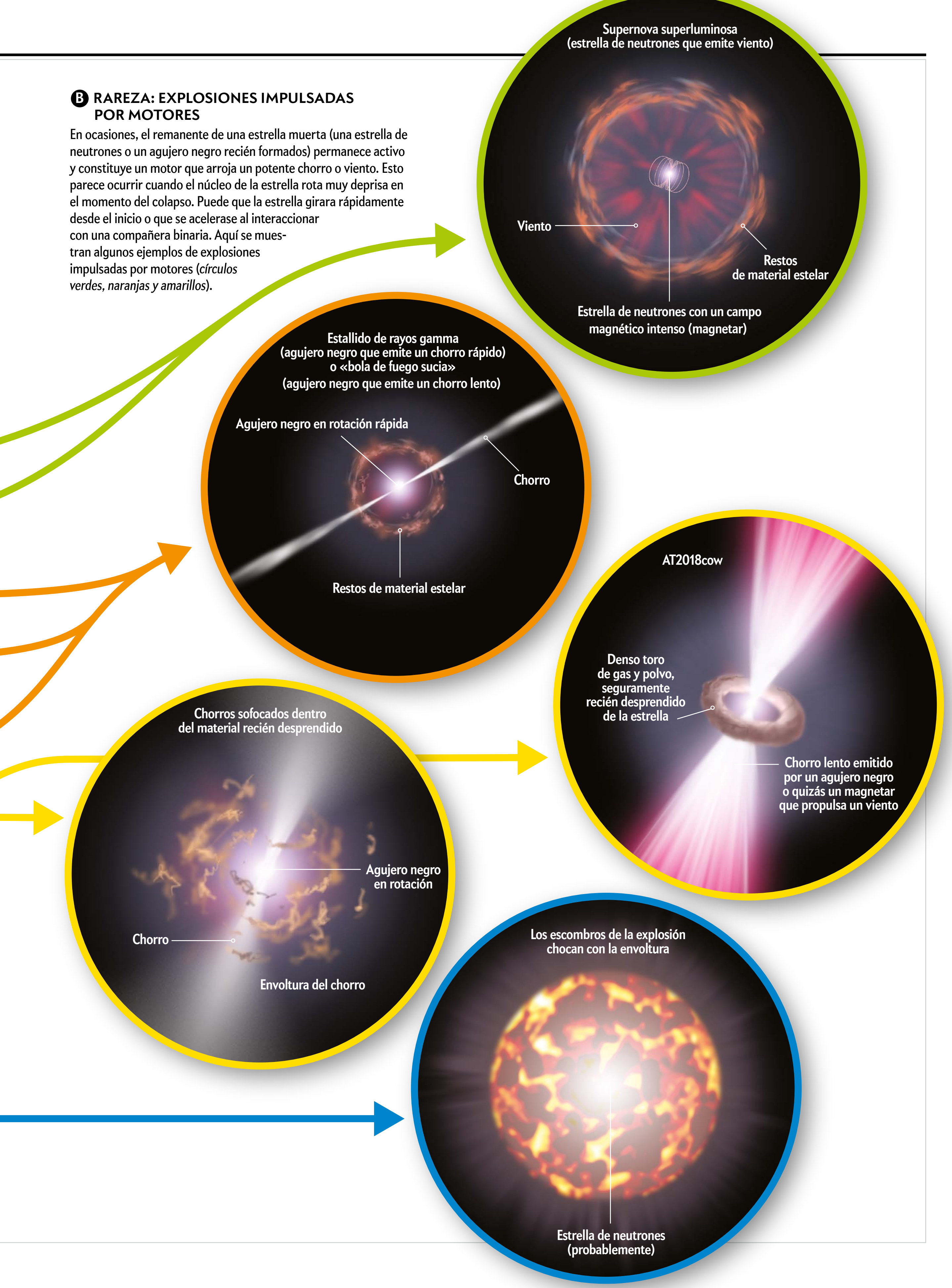
Los astrónomos han descubierto que algunas estrellas masivas se desprenden de una parte importante de sus atmósferas en los últimos días o semanas de vida. Cuando la estrella explota, los escombros del estallido chocan con el material recién desprendido y generan brillo. No se sabe por qué algunas estrellas hacen esto y otras no. ¿Podría deberse a una rotación rápida o a la interacción con otro astro? ¿Quizá responde a cambios producidos en el seno de la estrella durante las últimas fases de la combustión nuclear? Aquí vemos un ejemplo basado en SN2018gep, una supernova observada hace poco (*círculo azul*).



RON MILLER

B RAREZA: EXPLOSIONES IMPULSADAS POR MOTORES

En ocasiones, el remanente de una estrella muerta (una estrella de neutrones o un agujero negro recién formados) permanece activo y constituye un motor que arroja un potente chorro o viento. Esto parece ocurrir cuando el núcleo de la estrella rota muy deprisa en el momento del colapso. Puede que la estrella girara rápidamente desde el inicio o que se acelerase al interaccionar con una compañera binaria. Aquí se muestran algunos ejemplos de explosiones impulsadas por motores (*círculos verdes, naranjas y amarillos*).



Viene de la página 21
de ellos que salen indemnes? En otras palabras, los GRB podrían representar las raras ocasiones en que los chorros escapan de sus estrellas sin haberse ralentizado demasiado. De ser así, se producirían una enorme cantidad de muertes estelares imposibles de observar con los satélites de rayos gamma.

En mi tesis doctoral, me propuse detectar la posluminiscencia de los GRB sin depender del aviso de un satélite. Mi plan era usar el Instrumento para Fenómenos Transitorios Zwicky (ZTF), un telescopio robótico situado en el observatorio de Monte Palomar, en California, para observar el cielo en busca de puntos de luz inusualmente fugaces y brillantes, lista para reaccionar con premura. Cuando presenté mi propuesta de tesis en mayo de 2018, mis tutores me advirtieron de que tal vez no encontrase lo que buscaba. Me instaron a que me mantuviera alerta por si aparecían nuevas vías de investigación, y al cabo de un mes ocurrió justamente eso. Dos años más tarde, cuando leí la tesis, no se parecía demasiado a mi idea inicial.

LA VACA

Al comenzar mi investigación, escribí un programa para identificar fenómenos celestes cuyo brillo variara más deprisa que el de las supernovas ordinarias. Un día normal examinaba entre 10 y 100 posibles eventos candidatos, para concluir que ninguno de ellos era lo que buscaba. Pero otros días encontraba algo que me hacía dudar.

En junio de 2018, vi un informe del telescopio robótico ATLAS que anunciaba la observación de un extraño evento bautizado como AT2018cow. («AT» es el prefijo que se asigna de manera automática a cualquier nuevo evento transitorio, «2018» denota el año del descubrimiento, y «cow» es una secuencia única de letras.) En los días siguientes se notificaron algunas similitudes entre el evento y los GRB, pero no se había detectado ningún destello de rayos gamma. «¡Ajá!», pensé, «¡aquí lo tenemos!». Debido a su brillo y cercanía, AT2018cow suscitó un enorme interés, y los astrónomos de todo el mundo analizaron el evento a lo largo del espectro electromagnético. Enseguida hice planes para observar AT2018cow con el Conjunto Submilimétrico (SMA), un radiotelescopio situado en Hawái.

AT2018cow nos sorprendió a todos, puesto que se desarrolló de un modo radicalmente distinto a todas las explosiones cósmicas observadas hasta entonces. Parecíamos los protagonistas de esa parábola clásica en la que un grupo de personas trata de identificar un elefante en la oscuridad: una de ellas palpa la trompa y afirma que es una tubería, otra piensa que la oreja es un abanico y una tercera cree que la pata es un árbol. Del mismo modo, AT2018cow compartía características con varios tipos de fenómenos, pero no resultaba sencillo componer una imagen completa.

Mis colaboradores y yo nos pasamos largos días (con sus largas noches) repasando nuestros datos una y otra vez, tratando de interpretarlos. Algunos de esos momentos figuran entre mis mejores recuerdos del doctorado: el día que calculamos las propiedades de la onda de choque en una pizarra, la imagen de un miembro del grupo que corre por el pasillo mientras agita una hoja con nuevos resultados, el cruce de miradas atónitas al descubrir otra hermosa medición. Al final, concluimos que AT2018cow presentaba dos peculiaridades relevantes. La primera era que poseía un motor central como el de los GRB, aunque con una duración de semanas en vez de días: los rayos X procedentes del centro de la explosión habían mantenido su brillo durante mucho más tiempo del esperado. La segunda era que, por alguna razón, cuando la estrella estalló se encontraba rodeada por una envoltura de gas y polvo con una masa unas mil veces menor que la del Sol. Dedujimos esto a partir de pruebas indirectas: tras la explosión, vimos un destello de luz visible y ondas de radio que parecía corresponder al impacto de los escombros contra una masa situada en torno a la estrella. Estas envolturas se han observado en otros tipos de explosiones, pero no sabemos cómo se originan, si bien puede que la estrella expulse ese material poco antes de morir.

Si nuestra teoría es correcta, los astrónomos habrían presenciado por primera vez el nacimiento de un objeto compacto como una estrella de neutrones o un agujero negro, ya que estos cuerpos casi siempre quedan ocultos tras los restos de la estrella. En el caso de AT2018cow, creemos que llegamos a observar el objeto compacto que produjo esa emisión de rayos X tan asombrosamente variable y brillante. Pero aún quedan muchas incógnitas. ¿Qué tipo de estrella era la que explotó? ¿El motor central era una estrella de neutrones o un agujero negro? ¿Por qué la estrella arrojó material poco antes de explotar? Para avanzar, necesitábamos estudiar eventos similares, así que nos propusimos hallar otra AT2018cow con el observatorio ZTF.

Si nuestra teoría es correcta, los astrónomos habrían presenciado por primera vez el nacimiento de un objeto compacto: una estrella de neutrones o un agujero negro

Tres meses después, pensé que lo habíamos logrado: al principio, la brillante explosión del 9 de septiembre de 2018 parecía muy similar a AT2018cow. Sin embargo, al cabo de una semana quedó claro que se trataba de una supernova de tipo Ic-BL, las asociadas a los GRB. Yo estaba emocionada: la explosión, denominada SN2018gep, no era otra AT2018cow, pero por fin teníamos algo que se parecía a un GRB. En cinco días habíamos reunido observaciones detalladas en todo el espectro electromagnético. Analizamos los datos en busca de pruebas de un chorro, pero no encontramos ninguna. En cambio, llegamos de nuevo a la conclusión de que estábamos viendo una emisión óptica, brillante y de evolución rápida generada por el impacto de los escombros de una explosión contra una envoltura de material estelar.

Eso constituyó una sorpresa. Aunque se han observado envolturas alrededor de otros tipos de estrellas, no son habituales en las supernovas asociadas a los GRB. Nuestro hallazgo implica que hay más estrellas de las que pensábamos que arrojan gas al final de su existencia. Sabemos que el gas se desprendió en

los últimos momentos de la vida de la estrella porque estaba muy cerca de ella cuando ocurrió la explosión; si hubiera sido expulsado antes, habría tenido tiempo de alejarse más. Así que la estrella se despojó de una parte importante de su atmósfera exterior en los últimos días o semanas de su vida, tras brillar durante millones o decenas de millones de años. Por consiguiente, parece que esa emisión anuncia la muerte de la estrella.

De nuevo, surgían varias preguntas. ¿Cómo de habituales son esos «presagios funestos» en diferentes tipos de estrellas? ¿Qué mecanismo físico los origina? Me di cuenta de que ya tenía una nueva línea de investigación: no solo los GRB y los chorros, sino también las señales que alertan de la explosión inminente de una estrella masiva. Y hasta podía ser que esos fenómenos estuvieran relacionados.

En los últimos seis meses de mi doctorado detecté por fin la posluminiscencia de un GRB. El 28 de enero de 2020, llevaba a cabo mi habitual revisión de eventos candidatos cuando descubrí uno que parecía prometedor. Sabía que no debía emocionarme: había tenido demasiadas falsas alarmas a lo largo de los años. Enseguida pedí observaciones adicionales con un telescopio de la isla canaria de La Palma, y estas confirmaron que la fuente se desvanecía rápidamente, como cabría esperar de un rescoldo. Esa misma noche solicité observaciones urgentes con el telescopio Hale, un instrumento de 508 centímetros ubicado en el Observatorio de Monte Palomar, las cuales demostraron que la fuente seguía atenuándose. La noche siguiente le tocó el turno al telescopio espacial Swift, que me sirvió para detectar los rayos X procedentes del evento, una prueba casi definitiva de que se trataba de la posluminiscencia de un GRB. Y una noche después obtuve una breve ventana de tiempo con el telescopio Keck de Hawái, con el que esperaba determinar la distancia a la que se produjo la explosión.

Pasé la noche dentro de un saco de dormir en la sala de observación remota de mi universidad, el Instituto de Tecnología de California, y puse una alarma a las 4 de la mañana. Llegado el momento, sentí pánico: estaba realizando esta observación a última hora de la noche, el cielo empezaba a clarear, la fuente era muy tenue y me aterraba llegar tarde. Hice todo lo que estaba en mi mano. Cuando hubo demasiada claridad para seguir observando, llamé por Skype a mi colaborador Dan Perley, de la Universidad John Moores de Liverpool, y analizamos juntos los datos. Había tenido suerte: aunque la señal era débil, la luz del evento presentaba una característica muy notoria que nos permitió calcular la distancia. Y esta resultó ser enorme: un corrimiento al rojo de 2,9, lo que implica que la longitud de onda de la luz había aumentado considerablemente durante su viaje por el cosmos. La estrella estalló cuando el universo tenía tan solo 2300 millones de años, y los fotones de la explosión tardaron 11.400 millones de años en llegar a la Tierra. Hoy, el cataclismo se encuentra a una distancia de 21.000 millones de años luz, puesto que el universo se ha expandido mucho desde que se produjo. Era justo lo que estaba buscando.

Unos meses después de hallar nuestra primera posluminiscencia, llegó otra. Antes del ZTF solo se habían descubierto tres de estos resplandores sin un GRB que indicara a los astrónomos dónde buscar, y nosotros identificamos dos en apenas unos meses. Ahora que tenemos una estrategia de búsqueda afinada y operativa, espero que podamos detectarlos de forma rutinaria. No obstante, a pesar de contar con esas dos observaciones, aún no puedo responder de manera concluyente las preguntas que me había propuesto resolver. Al ver un rescoldo concreto, es difícil determinar si estamos ante algo nuevo o se trata simplemente de un GRB ordinario que se les ha escapado a los satélites de alta energía. Necesitamos hallar más eventos para determinar si estamos presenciando fenómenos realmente distintos.

AMPLIAR EL CATÁLOGO

Desde el descubrimiento de AT2018cow, un nuevo e inesperado tipo de explosión impulsada por un motor, mi búsqueda ha desvelado todo un abanico de eventos estelares inusuales: la extraña supernova Ic-BL (el tipo asociado a los GRB) que chocó contra una envoltura de material estelar pero no mostró indicios de un chorro potente (el sello distintivo de un GRB); el otro evento similar a AT2018cow; dos supernovas Ic-BL que probablemente presentaban chorros, aunque menos energéticos y más anchos que los de un GRB típico; y finalmente, justo al final de mi doctorado, dos verdaderos rescoldos cosmológicos, uno de los cuales resultó estar asociado a un GRB.

Hasta ahora, los astrónomos hemos actuado como zoólogos que se adentran en un territorio relativamente inexplorado y caracterizan las distintas criaturas (en este caso, explosiones) que se encuentran. La siguiente fase consistirá en buscar patrones. ¿Cuál es la frecuencia relativa con que ocurre cada tipo de explosión? ¿Parecen estallar solo en cierto tipo de galaxias? ¿Estamos realmente ante «especies» distintas, o son diferentes manifestaciones de un mismo fenómeno?

Para despejar tales incógnitas, necesitaremos un catálogo de explosiones mucho más amplio. Dentro de unos años, el observatorio Vera C. Rubin, que se está construyendo en Chile, empleará la mayor cámara digital jamás construida (con 3000 millones de píxeles) para detectar 10 millones de posibles fenómenos transitorios cada noche, 10 veces más que el ZTF. Cuando disponga de más datos, me gustaría investigar qué tipo de estrellas pierden parte de su masa justo antes de morir y con qué frecuencia sucede. Quiero saber cómo determinar si ha habido un chorro que no logró atravesar la estrella, y aprender a reconocer las tenues emisiones generadas durante la agonía de una estrella, a fin de predecir dónde y cuándo se producirá una explosión. En última instancia, me gustaría analizar los factores que conducen a esas muertes atípicas. Puede que la velocidad de rotación de una estrella o sus interacciones con otros astros estén detrás de estas explosiones tan espectaculares como inusuales. IyC

PARA SABER MÁS

An embedded X-ray source shines through the aspherical AT 2018cow: Revealing the inner workings of the most luminous fast-evolving optical transients. R. Margutti et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 872, art. 18, febrero de 2019.

Evidence for late-stage eruptive mass loss in the progenitor to SN2018gep, a broad-lined Ic supernova: Pre-explosion emission and a rapidly rising luminous transient. Anna Y. Q. Ho et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 887, art. 169, diciembre de 2019.

ZTF20aajnksq (AT 2020blt): A fast optical transient at z ≈ 2.9 with no detected gamma-ray burst counterpart. Anna Y. Q. Ho et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 905, art. 98, diciembre de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

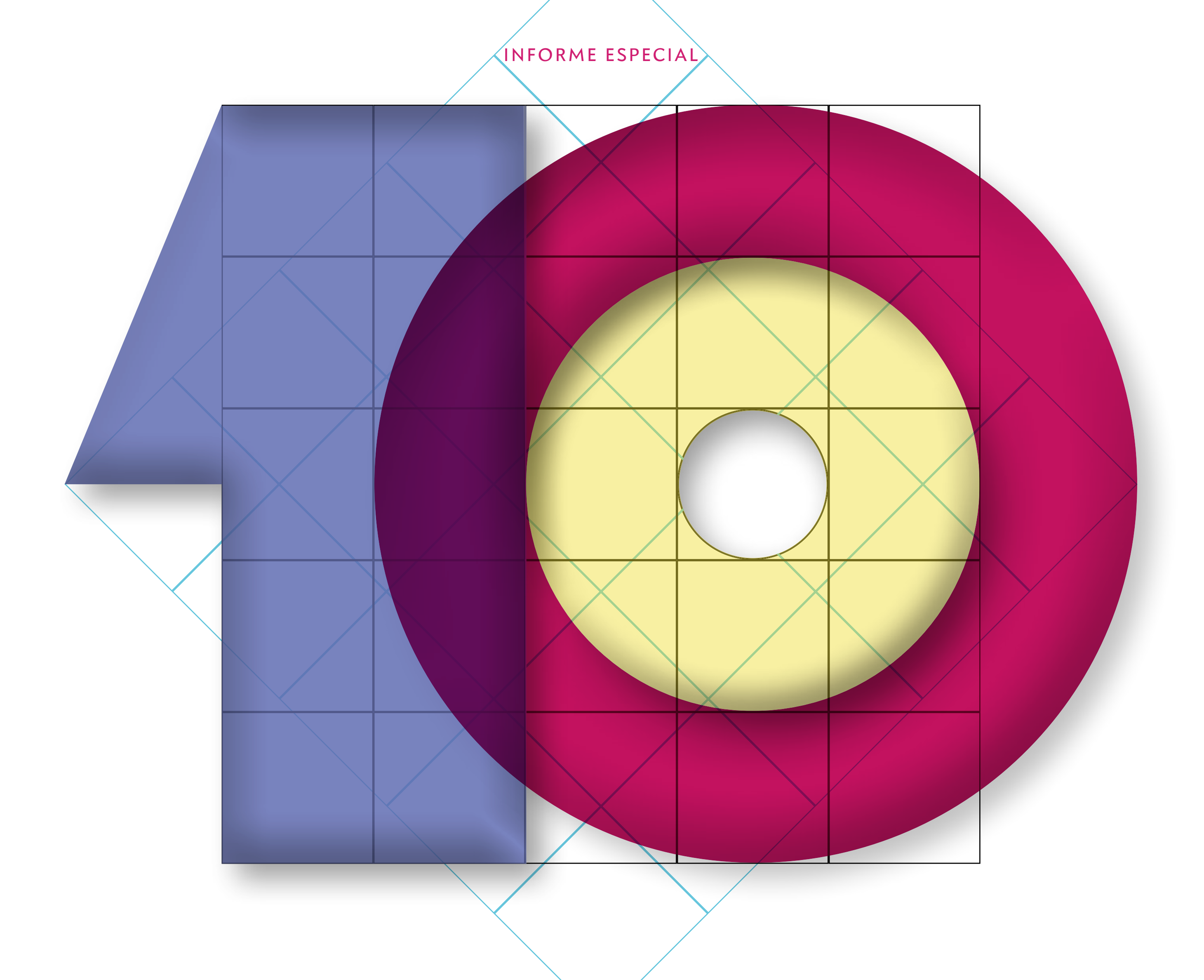
Las explosiones más brillantes del universo. Neil Gehrels, Luigi Piro y Peter J. T. Leonard en *IyC*, febrero de 2003.

Supernovas extrañas. Daniel Kasen en *IyC*, agosto de 2016.

Observan en tiempo real la posible formación de un agujero negro. Davide Castelvecchi en www.investigacionyciencia.es, 5 de noviembre de 2018.

El Koala y la Vaca en una nueva clase de explosiones cósmicas. Alina Schadwinkel en www.investigacionyciencia.es, 1 de junio de 2020.





LAS 10 TÉCNICAS EMERGENTES MÁS PROMETEDORAS DEL MOMENTO

LOS EXPERTOS DESTACAN LOS AVANCES TÉCNICOS CON MAYOR POTENCIAL PARA REVOLUCIONAR LA INDUSTRIA, LA ASISTENCIA SANITARIA Y LA SOCIEDAD

Ilustraciones de Vanessa Branchi

EN SÍNTESIS

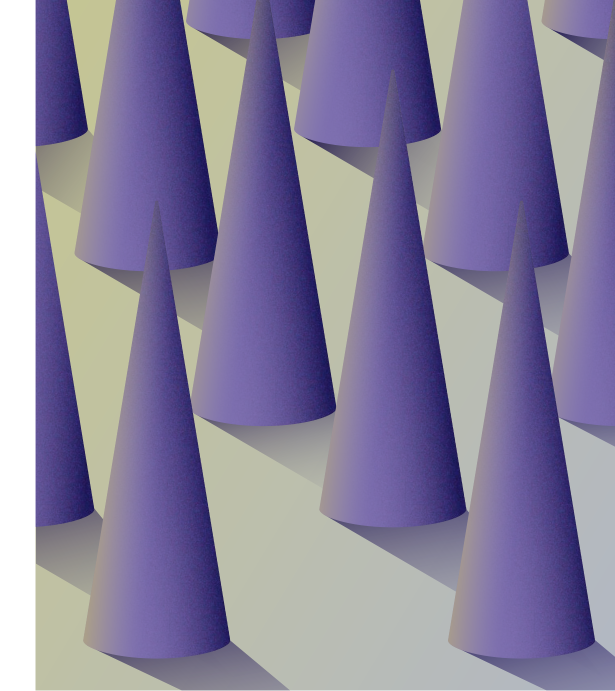
En el campo de la medicina, las microagujas harán indoloras las extracciones de sangre y las inyecciones. Los pacientes virtuales volverán más rápidos y seguros los ensayos clínicos. Y, cada vez más, las aplicaciones informáticas detectarán enfermedades y ofrecerán pautas terapéuticas a las personas.

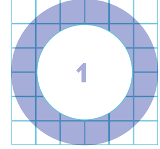
El impacto ambiental de la aviación disminuirá gracias a las aeronaves eléctricas y surgirán nuevos tipos de hormigón para mitigar las emisiones asociadas a la fabricación del cemento. Veremos cómo la luz del sol transforma el CO_2 en sustancias valiosas por medio de fotocatalizadores. Y los excedentes de energía renovable servirán para producir hidrógeno verde, un combustible totalmente limpio.

Las mediciones ultraprecisas de los sensores cuánticos se usarán en sistemas de navegación o para monitorizar la salud. Las realidades virtual y aumentada se verán superadas por la computación espacial. Y pronto se logrará sintetizar genomas enteros de gran tamaño, como los de plantas, animales y humanos.

Si algunos de los numerosos voluntarios que participaron en los estudios clínicos de las vacunas contra la COVID-19 se hubieran sustituido por réplicas digitales —una de las diez técnicas emergentes más prometedoras del momento—, estas podrían haberse desarrollado aún más rápido y se habrían salvado incontables vidas. Los ensayos virtuales para evaluar nuevas vacunas y tratamientos podrían convertirse pronto en una realidad. Otras de las técnicas destacadas reducirán las emisiones de gases de efecto invernadero al electrificar el transporte aéreo y al propiciar que la luz solar suministre la energía para la producción de compuestos químicos industriales. Con la computación espacial, los mundos físico y digital se integrarán de formas que batirán las proezas de la realidad virtual. Y los sensores ultrasensibles que aprovechan procesos cuánticos abonarán el terreno para aplicaciones como escáneres cerebrales portátiles y vehículos que ven tras las esquinas.

Al igual que estas, el resto de las técnicas emergentes de este informe especial las ha elegido un comité internacional de expertos, convocado por *Scientific American* y el Foro Económico Mundial, que ha examinado más de 75 propuestas. Para lograr el reconocimiento, las técnicas deben tener el potencial de estimular el progreso de la sociedad y de la economía al mejorar la manera establecida de hacer las cosas. También han de ser novedosas (es decir, su uso actual no debe estar muy extendido) y se les debe prever una gran repercusión en un plazo de tres a cinco años. El comité de expertos se reunió (de forma virtual) para descartar y evaluar a fondo las propuestas mejor posicionadas antes de tomar la decisión final. Confiamos en que las siguientes notas sean tan estimulantes para los lectores como lo son para nosotros.





MEDICINA

Microagujas para inyecciones y pruebas indoloras

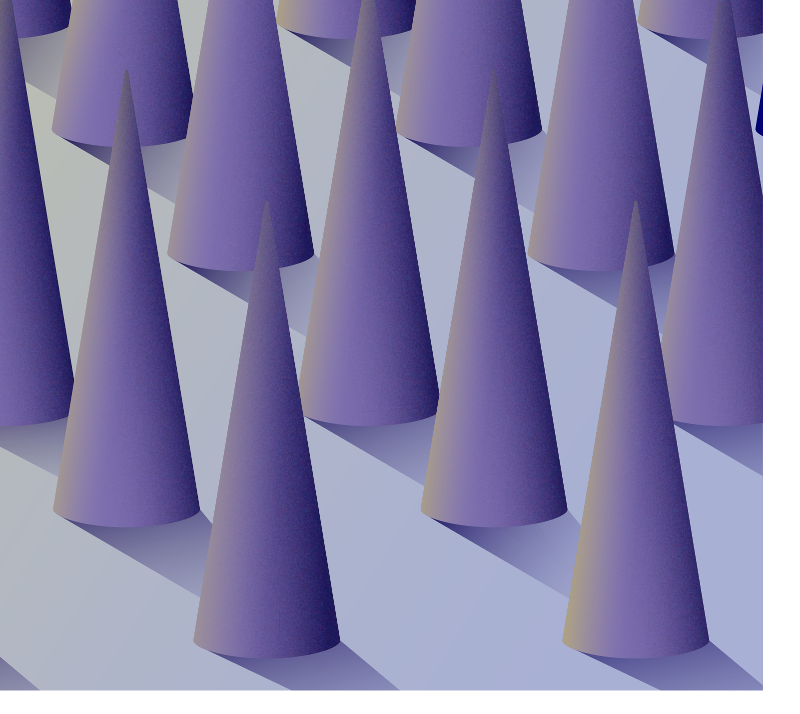
REDUCIRÁN LOS DESPLAZAMIENTOS AL LABORATORIO DE ANÁLISIS Y HARÁN MÁS ACCESIBLE LA ATENCIÓN SANITARIA

Por Elizabeth O'Day

Las microagujas están listas para iniciar la era de las inyecciones y los análisis de sangre indoloros. Acopladas a una jeringa o en un parche, estas agujas apenas visibles no causan dolor porque no entran en contacto con las terminaciones nerviosas. Con una longitud de entre 50 y 2000 micras (el grosor de una hoja de papel) y una anchura de entre 1 y 100 micras (la del cabello humano), atraviesan la capa superior de la piel, formada por células muertas, y llegan a la segunda capa, la epidermis, compuesta por células vivas y líquido intersticial. Pero la mayoría no alcanza, o apenas toca, la dermis subyacente, donde se encuentran las terminaciones nerviosas, junto con los vasos sanguíneos y linfáticos y el tejido conjuntivo.

Ya se comercializan diversos parches y jeringas con microagujas para administrar vacunas, y otros muchos se están examianando en ensayos clínicos para el tratamiento de la diabetes, el cáncer y el dolor neuropático. Al insertar los medicamentos directamente en la epidermis o la dermis, son mucho más eficientes que los parches transdérmicos habituales, que actúan por difusión a través de la piel. El año pasado se presentó una técnica novedosa para tratar trastornos de la piel, como la psoriasis, verrugas y ciertos tipos de cáncer. Esta incorpora microagujas con forma de estrella a una crema o gel terapéuticos. La delicada perforación momentánea de la piel con las agujas favorece el paso de la sustancia terapéutica.

Numerosos productos con microagujas van camino de comercializarse para la extracción rápida e indolora de muestras de sangre o de líquido intersticial, así como para pruebas diagnósticas o



controles del estado de salud. Los diminutos orificios que abren las agujas inducen un cambio local de presión en la epidermis o la dermis que desplaza el líquido intersticial o la sangre hacia un instrumento de recogida. Si las agujas llevan biosensores acoplados, los instrumentos pueden medir directamente, en cuestión de minutos, biomarcadores indicativos del estado de salud, como la glucosa, el colesterol, el alcohol, derivados de fármacos o células inmunitarias.

Algunos productos permitirían extraer las muestras en casa y enviarlas por correo al laboratorio o analizarlas allí mismo. Al menos uno de ellos ya ha superado los trámites reglamentarios para dicho uso: el dispositivo de recogida de sangre TAP de Seventh Sense Biosystems, aprobado recientemente en EE.UU. y Europa, permite a cualquier persona recoger una pequeña muestra de sangre, ya sea para enviarla al laboratorio o para autocontrol. En el ámbito de la investigación, también se están integrando microagujas en aparatos de comunicación inalámbrica con objeto de medir moléculas biológicas, determinar con esa medición la dosis adecuada de un medicamento y administrarla después, una estrategia que llevaría a la práctica la promesa de la medicina personalizada.

Como no requieren equipos costosos ni excesiva formación para su administración, los dispositivos con microagujas permitirían llevar a cabo pruebas y tratamientos en zonas con escasos recursos sanitarios. Micron Biomedical ha elaborado uno de estos productos fáciles de usar, un parche del tamaño de una tirita que cualquiera puede aplicar. Otra empresa, Vaxxas, está desarrollando un parche de vacuna con microagujas que, en las pruebas en animales y en los primeros estudios humanos, intensificó la respuesta inmunitaria con una mínima parte de la dosis habitual. Las microagujas también reducen el riesgo de contagiar virus de transmisión hemática y disminuyen los desechos peligrosos que acarrea la eliminación de las agujas clásicas.

Sin embargo, las agujas diminutas no siempre suponen ventajas, ya que no resultarán adecuadas si se precisan grandes dosis. No todos los medicamentos pueden atravesar las microagujas, ni es posible obtener con ellas muestras de todos los biomarcadores. Y aún debe investigarse si la eficacia de la técnica se ve afectada por factores como la edad y el peso del paciente, el lugar de inyección y el método de aplicación. No obstante, cabe esperar que estas agujas indoloras amplíen notablemente la administración de medicamentos y las pruebas diagnósticas; y surgirán nuevos usos cuando los investigadores ideen formas de utilizarlas en órganos internos, más allá de la piel.

COMITÉ DE EXPERTOS

Mariette DiChristina, presidenta del comité, es decana y profesora de práctica periodística en la Facultad de Comunicación de la Universidad de Boston. Fue redactora jefa de *Scientific American* y directora de edición, publicación y revistas de Springer Nature.

Bernard S. Meyerson, vicepresidente del comité, es director de innovación emérito de IBM. Ha recibido numerosos galardones por sus trabajos en física, ingeniería y economía.

Anas Faris Al-Faris es director de la Ciudad Rey Abdulaziz para la Ciencia y la Tecnología de Riad, Arabia Saudí.

Jeff Carbeck es fundador de varias empresas y director ejecutivo de 10EQs.

Rona Chandrawati es profesora en la Universidad de Nueva Gales del Sur y directora del Laboratorio de Nanotecnología para Alimentación y Medicina.

P. Murali Doraiswamy, médico, inventor y profesor de la Facultad de Medicina de la Universidad Duke, es un destacado investigador en tecnologías del futuro y medicina de precisión y miembro de los consejos para el futuro global del Foro Económico Mundial (FEM).

Seth Fletcher es editor jefe de las secciones especializadas de *Scientific American*.

Javier García Martínez es profesor de química inorgánica y director del Laboratorio de Nanotecnología Molecular de la Universidad de Alicante.

Katherine Hamilton es directora del Proyecto de Energía Limpia e Innovación y presidenta de 38 North Solutions. Ha presidido varios consejos del FEM.

Rigas Hadzilacos es jefe de proyecto de la iniciativa Prepararse para el Futuro del Trabajo del FEM.

Daniel E. Hurtado es profesor de la Pontificia Universidad Católica de Chile. El FEM lo nombró uno de los diez científicos más influyentes del futuro.

Wendy Ju es profesora en el Instituto Jacobs de la Universidad Cornell. Participa en el Consejo Global de Movilidad Autónoma y Urbana del FEM.

Corinna E. Lathan es cofundadora y directora ejecutiva de AnthroTronix, y forma parte de la junta directiva de PTC. Fue presidenta fundadora del Consejo para el Futuro Global sobre el Perfeccionamiento Humano del FEM.

Sang Yup Lee, copresidente del Consejo para el Futuro Global sobre Biotecnología del FEM, es profesor distinguido de ingeniería química y biomolecular en el Instituto Superior de Ciencia y Tecnología de Corea. Cuenta en su haber con más de 700 patentes.

Geoffrey Ling, coronel retirado del Ejército de EE.UU., es experto en desarrollo de tecnología y transición comercial. Es profesor de neurología en la Universidad de Ciencias de la Salud de los Servicios Uniformados y en la Universidad Johns Hopkins, y socio de Ling & Associates.

Tammy Ma es directora del programa de Láseres de Alta Intensidad del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore.

Andrew Maynard es director del Laboratorio de Innovación en Riesgos de la Universidad Estatal de Arizona. Su trabajo se centra en el desarrollo y uso responsable de tecnologías emergentes.

Ruth Morgan es profesora de criminalística y ciencias forenses en el Colegio Universitario de Londres y directora del Centro de Ciencias Forenses de dicha universidad. Es miembro del Consejo para el Futuro Global sobre la Realidad Virtual y Aumentada del FEM.

Elizabeth O'Day es directora general y fundadora de Olaris y copresidenta del Consejo para el Futuro Global sobre Biotecnología del FEM.

Carlo Ratti es director del Laboratorio Senseable City del Instituto de Tecnología de Massachusetts y socio fundador del estudio de diseño Carlo Ratti Associati.

Barry Shoop, general de brigada retirado del Ejército de EE.UU., es decano de la Escuela de Ingeniería Albert Nerken en la universidad Cooper Union.

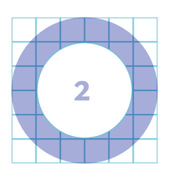
María Elena Torres-Padilla es directora del Instituto de Epigenética y Células Madre del Centro Helmholtz de Múnich y profesora de biología de células madre en la Universidad de Múnich.

Sophia M. Velastegui es directora de tecnología para las aplicaciones de operaciones de Dynamics 365, en Microsoft. Es experta en inteligencia artificial del Consejo para el Futuro Global sobre Manufactura y Producción Avanzadas del FEM.

Angela Wu es profesora adjunta en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong y cofundadora de Agenovir, una compañía de terapias génicas basadas en CRISPR.

Xu Xun es director ejecutivo de la organización global de genómica BGI y miembro del Consejo para el Futuro Global sobre Biotecnología del FEM.

AUTOR INVITADO
Andrew Hessel es presidente de Humane Genomics.



INGENIERÍA QUÍMICA

Química impulsada por el sol

LA LUZ VISIBLE PUEDE INDUCIR PROCESOS QUE CONVIERTEN EL DIÓXIDO DE CARBONO EN MATERIALES COTIDIANOS

Por Javier García Martínez

La síntesis de muchas sustancias importantes para nuestra salud y bienestar requiere combustibles fósiles, por lo que contribuye a las actividades extractivas, las emisiones de carbono y el cambio climático. Una nueva técnica que emplea la luz solar para convertir el dióxido de carbono residual en esos valiosos compuestos podría reducir las emisiones de dos formas distintas: usando el gas indeseado como materia prima y la luz del sol, en vez de los combustibles fósiles, como fuente de energía.

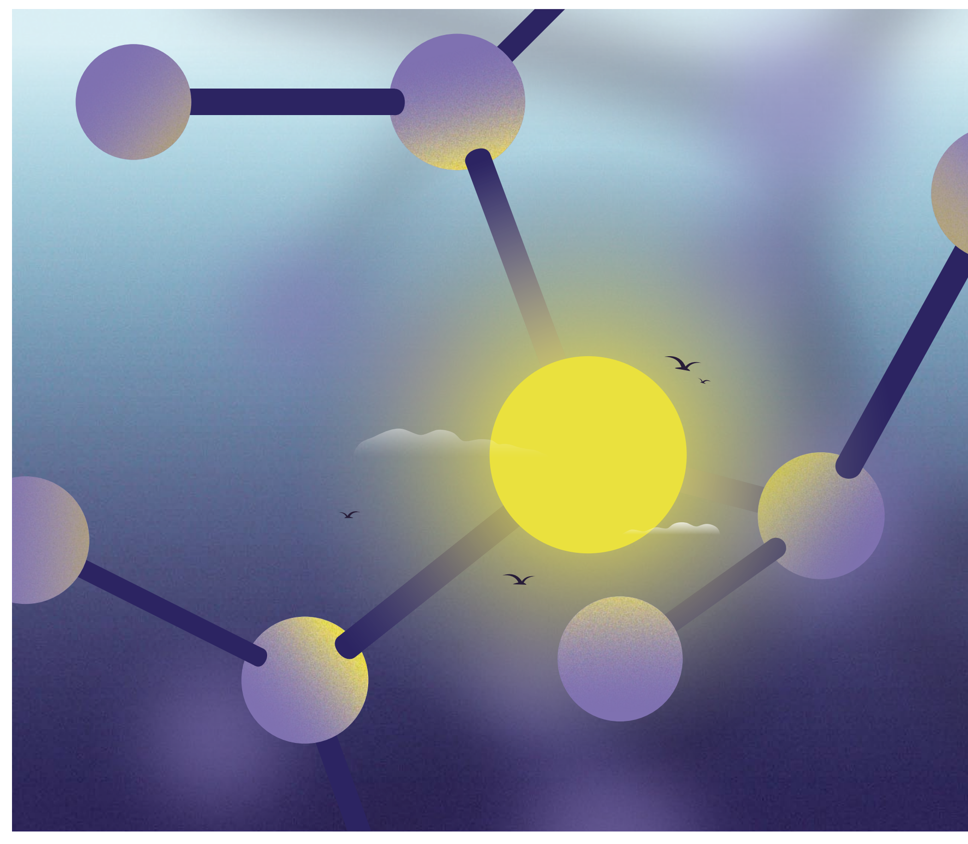
El proceso es cada vez más viable gracias a los avances en la catálisis activada por la luz del sol, o fotocatálisis. En los últimos años, se han desarrollado fotocatalizadores capaces de romper el fuerte enlace doble entre el carbono y el oxígeno del dióxido de carbono. Este es un primer paso crucial para crear refinerías «solares» que produzcan compuestos útiles a partir del gas residual, incluidas moléculas «plataforma» que sirvan de materia prima en la síntesis de fármacos, detergentes, fertilizantes o fibras textiles.

Los fotocatalizadores suelen ser semiconductores que precisan radiación ultravioleta de alta energía para generar los electrones implicados en la transformación del dióxido de carbono. Pero la luz ultravioleta es escasa (representa apenas el 5 por ciento de la radiación solar) y dañina, así que obtener nuevos catalizadores que funcionen con luz visible, más abundante e inocua, ha sido un objetivo prioritario. La estrategia actual consiste en modificar la composición, estructura y morfología de catalizadores existentes, por ejemplo el dióxido de titanio. Aunque este compuesto convierte el dióxido de carbono en otras moléculas en respuesta a la radiación ultravioleta, al doparlo con nitrógeno se reduce mucho la energía requerida. El catalizador modificado solo necesita luz visible para producir sustancias muy usadas, como metanol, formaldehído y ácido fórmico (importantes en la fabricación de adhesivos, espumas, contrachapados, muebles, revestimientos para suelos y desinfectantes).

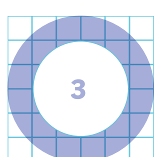
Por el momento, la investigación en química solar se lleva a cabo principalmente en laboratorios de instituciones académicas, entre las que figuran el Centro Conjunto para la Fotosíntesis Artificial, dirigido por el Instituto de Tecnología de California en asociación con el Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley; el Consorcio Sunrise, una colaboración radicada en los Países Bajos entre universidades, organismos de investigación y tecnología, y la industria; o el Departamento de Reacciones Heterogéneas del Instituto Max Planck para la Conversión Química de Energía de Mülheim.

Y algunas empresas emergentes exploran un método distinto para transformar el dióxido de carbono en sustancias útiles: aplicar electricidad para promover las reacciones químicas. Esta estrategia tendría un mayor impacto ambiental si la electricidad procediera de la quema de combustibles fósiles, pero eso podría evitarse usando energía solar fotovoltaica.

Sin duda, estos avances en química solar se comercializarán y perfeccionarán en los próximos años. Entonces la industria química, al convertir lo que hoy es dióxido de carbono residual en productos valiosos, estará más cerca de poder integrarse en una verdadera economía circular y libre de desechos, así como de ayudar a cumplir el objetivo de generar emisiones negativas.







ATENCIÓN SANITARIA

Pacientes virtuales

SUSTITUIR A LOS HUMANOS POR SIMULACIONES PERMITIRÍA ENSAYOS CLÍNICOS MÁS RÁPIDOS Y SEGUROS

Por Daniel E. Hurtado y Sophia M. Velastegui

Constantemente aparecen nuevos algoritmos informáticos que diagnostican enfermedades con una precisión sin precedentes. Ello reafirma la predicción de que los ordenadores reemplazarán pronto a los médicos. ¿Y si las computadoras también pudieran hacer las veces de los pacientes? Si en algunas etapas de los ensayos de las vacunas contra el nuevo coronavirus se hubiera sustituido a las personas por humanos virtuales, tal vez se habría acelerado el desarrollo de una estrategia preventiva que frenara la pandemia. También se habrían identificado antes las vacunas experimentales que no iban a funcionar, lo que habría aligerado los costes del ensayo y habría evitado administrar un producto deficiente a los voluntarios. Estas son algunas de las ventajas de la medicina informática (*in silico*), esto es, el examen de fármacos y tratamientos en órganos o sistemas corporales virtuales para predecir cómo responderán a ellos las personas reales. En un futuro cercano, aunque seguirán precisándose pacientes en las últimas fases de la investigación clínica, los ensayos en el ordenador harán posible evaluaciones iniciales de la seguridad y la eficacia, rápidas y económicas, que reducirán drásticamente el número de las personas necesarias para la experimentación.

Para crear órganos virtuales, se empieza por incorporar datos anatómicos del órgano real de una persona, obtenidos mediante técnicas de diagnóstico por imagen de alta resolución no invasivas, en un modelo matemático complejo de los mecanismos que dirigen la función de ese órgano. Las ecuaciones e incógnitas resultantes se resuelven mediante algoritmos ejecutados en potentes ordenadores, que generan un órgano virtual con el mismo aspecto y comportamiento que el real.

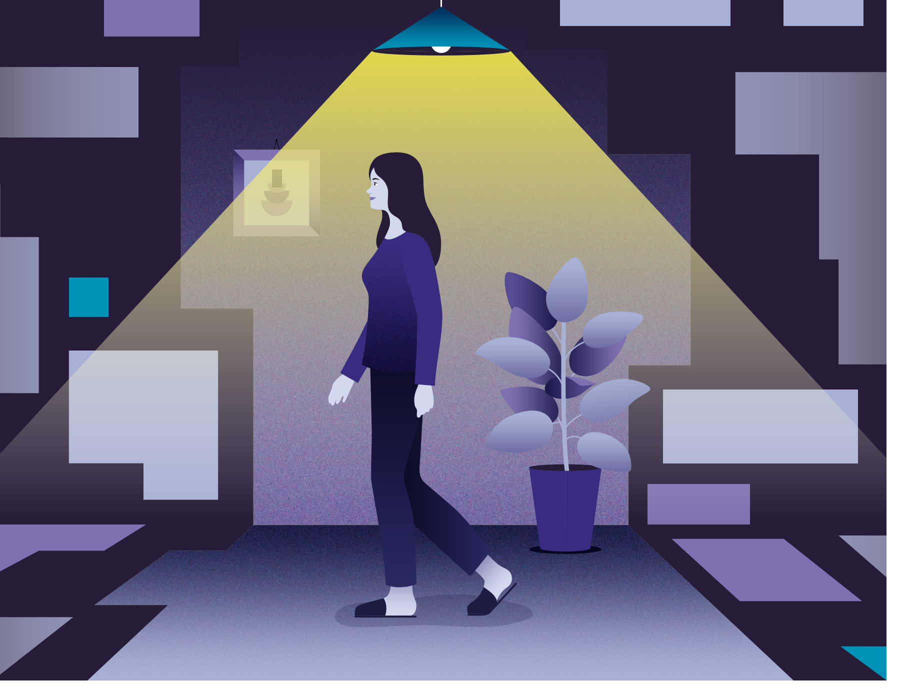
En cierta medida, ya se han puesto en marcha ensayos clínicos virtuales. Así, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) de EE.UU. emplea simulaciones por ordenador en lugar de ensayos con humanos para evaluar nuevos sistemas mamográficos. También ha publicado una guía para diseñar ensayos de medicamentos y productos sanitarios que incluyan pacientes virtuales.

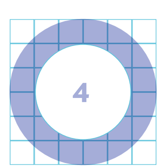
Aparte de acelerar los resultados y disminuir los riesgos, la medicina informática ahorraría las peligrosas intervenciones que se necesitan hoy para el diagnóstico y tratamiento de ciertas enfermedades. Por ejemplo, HeartFlow Analysis, un servicio en la nube aprobado por la FDA, permite a los médicos detectar una arteriopatía coronaria con las imágenes tomográficas del corazón del paciente. Con ellas, el sistema HeartFlow construye un modelo fluidodinámico de la sangre que circula por los vasos coronarios, capaz de revelar las anomalías existentes y su gravedad. Sin esta técnica, los médicos tendrían que realizar una angiografía invasiva para decidir si conviene intervenir y cómo hacerlo. La experimentación con modelos digitales de pacientes concretos también sirve para personalizar el tratamiento de diversas enfermedades y ya se utiliza en el control de la diabetes.

La teoría en la que se basa la medicina informática no es nueva. Desde hace décadas, la capacidad de crear y simular el comportamiento de un objeto en cientos de condiciones de funcionamiento es una piedra angular de la ingeniería, como en el diseño de circuitos electrónicos, aviones y edificios. Con todo, siguen existiendo obstáculos para su implantación generalizada en la investigación y el tratamiento médicos.

En primer lugar, queda por confirmar el valor predictivo y la fiabilidad de esta técnica, lo que requiere avanzar antes en algunos aspectos. Entre ellos se incluye la elaboración de bases de datos médicos de gran calidad a partir de una extensa población de pacientes, étnicamente diversa, con mujeres y con hombres; el refinamiento de los modelos matemáticos para tener en cuenta la miríada de procesos que interactúan en el organismo; y la modificación de los métodos de inteligencia artificial que se desarrollaron principalmente para el reconocimiento por ordenador de voz y de imágenes y que deben adaptarse para proporcionar conocimientos biológicos. Con objeto de llevar a efecto estos avances, la comunidad científica y la industria asociada han puesto en marcha iniciativas como el Proyecto del Corazón Vivo (Living Heart Project) de Dassault Systèmes, el Instituto de Fisiología Humana Virtual para la Investigación Biomédica Integral (vph-institute.org) y Healthcare NExT de Microsoft.

En los últimos años, la FDA y los reguladores europeos han aprobado algunos usos comerciales de técnicas diagnósticas por ordenador, pero cumplir las exigencias reglamentarias requiere gran cantidad de tiempo y dinero. La complejidad del ecosistema sanitario dificulta la creación de demanda para estas herramientas. Solo se acelerará la adopción de la técnica si la medicina informática tiene la capacidad de ofrecer un valor rentable a los pacientes, los médicos y las entidades sanitarias.





COMPUTACIÓN

Computación espacial

LA PRÓXIMA REVOLUCIÓN TRAS LA REALIDAD VIRTUAL Y LA AUMENTADA

Por Corinna E. Lathan y Geoffrey Ling

Imaginemos a Marta, una octogenaria que se desplaza en silla de ruedas y vive de manera independiente. Todos los objetos de su casa están recogidos en un catálogo digital, todos los sensores y dispositivos de control tienen acceso a Internet y el mapa de los objetos se ha fundido con un plano digital de la vivienda. Cuando Marta va del dormitorio a la cocina, se encienden las luces y cambia la temperatura ambiental. La silla se frenará si el gato se cruza en su camino. Al llegar a la cocina, la mesa se aparta para facilitar el acceso a la nevera y al horno, y retorna a su posición cuando la mujer se dispone a comer. Más tarde, si pierde el equilibrio al ir a acostarse, los muebles se mueven para protegerla y se envía una alerta a su hijo y a la estación de monitorización local.

La «computación espacial» en torno a la que gira esta escena constituye el próximo paso en la convergencia de los mundos físico y digital. Tiene las mismas posibilidades que las aplicaciones de realidad virtual y realidad aumentada: digitaliza objetos conectados a través de la nube, permite que los sensores y los motores interactúen, y crea una representación digital del mundo real. Pero, además, combina esas funciones con una cartografía espacial de alta fidelidad, que permite que un «coordinador» informático observe y controle los movimientos e interacciones de los objetos a medida que una persona se desplaza por el mundo digital o físico. Gracias a la computación espacial, las interacciones hombre-máquina y máquina-máquina alcanzarán nuevas cotas de eficacia en ámbitos como la industria, la asistencia médica, el transporte o el hogar. Algunas grandes compañías como Microsoft y Amazon ya han apostado fuerte por esta técnica.

Al igual que ocurre con la realidad virtual y la aumentada, la computación espacial se basa en el concepto de «gemelo digital», que surge en el diseño asistido por ordenador: una representación digital de un objeto que puede servir para imprimirlo en 3D, diseñar nuevas versiones de él, impartir formación sobre su uso o juntarlo con otros objetos digitales a fin de componer mundos virtuales.

Sin embargo, la computación espacial no genera solo gemelos digitales de objetos, sino también de personas y ubicaciones. Así, utiliza GPS, lídar (detección y localización por luz), vídeo y otras técnicas de geolocalización para trazar un mapa digital de una sala, un edificio o una ciudad. Los datos de los sensores y las representaciones de objetos y personas se integran en ese mapa mediante algoritmos, dando lugar a un mundo virtual que se puede observar, cuantificar y manipular... y que es capaz de actuar sobre el mundo real.

Consideremos una escena futurista en el ámbito médico: una ambulancia acude al piso de una persona que podría necesitar una operación urgente. El sistema envía el historial médico del paciente y datos en tiempo real sobre su estado a los dispositivos móviles de los técnicos sanitarios y al servicio de urgencias del hospital, mientras determina la mejor ruta para llegar al lugar. Los semáforos se van poniendo en rojo para retener el tráfico en los cruces y, nada más pararse la ambulancia, el portal del edificio se abre y el ascensor ya espera en la planta baja. Los objetos se apartan cuando los sanitarios entran corriendo con la camilla. Mientras el sistema les indica el camino más rápido a urgencias, los cirujanos usan computación espacial y realidad aumentada para ensayar la «coreografía» del quirófano o planificar la intervención en el cuerpo del paciente.

La industria ya ha comenzado a integrar sensores especializados, gemelos digitales y la Internet de las cosas para maximizar la productividad, y seguramente no tarde en adoptar la computación espacial. Esta técnica permitiría añadir un sistema de seguimiento basado en la posición a un aparato o a una fábrica entera. Los trabajadores encargados de reparar una máquina podrían guiarse usando visores de realidad aumentada o imágenes holográficas que muestren un mapa espacial de sus componentes; así la arreglarían de la forma más eficiente posible, reduciendo el tiempo de inactividad y los costes asociados. Y si un técnico interactuase con la versión en realidad virtual de un lugar remoto para dirigir a varios robots que construyen una fábrica, los algoritmos de computación espacial ayudarían a optimizar la seguridad, eficiencia y calidad del trabajo, mejorando la coordinación entre los robots y la asignación de tareas. En un ejemplo más cercano, las compañías minoristas o de comida rápida podrían combinar la computación espacial con técnicas clásicas de ingeniería industrial (como los estudios de tiempos y movimientos) para aumentar la eficiencia del flujo de trabajo.



MEDICINA

Medicina digital

APLICACIONES QUE DIAGNOSTICAN E INCLUSO TRATAN NUESTRAS DOLENCIAS

Por P. Murali Doraiswamy

¿Podría ser la próxima receta de nuestro médico una aplicación informática? Muchas de las que están en uso o en fase de desarrollo ya pueden detectar o vigilar trastornos físicos y mentales de manera autónoma e incluso ofrecer terapias. Estos programas, conocidos en conjunto como medicinas digitales, pretenden reforzar la atención médica tradicional y ofrecer apoyo a los pacientes en situaciones de dificultad de acceso a la asistencia sanitaria, una necesidad que la crisis de la COVID-19 ha exacerbado.

Numerosos sistemas de detección consisten en un dispositivo móvil que registra elementos del usuario tales como la voz, la ubicación, la expresión facial, el ejercicio físico, el sueño y la actividad de mensajes de texto; luego aplica inteligencia artificial para señalar la posible aparición o empeoramiento de una afección. Algunos relojes inteligentes, por ejemplo, contienen un sensor que reconoce automáticamente la fibrilación auricular (una alteración peligrosa del ritmo cardíaco) y alerta al portador. Se están poniendo a punto herramientas similares para identificar trastornos respiratorios, depresión, párkinson, alzhéimer, autismo y otras dolencias. Estos sistemas de detección, o «fenotipado digital», no van a sustituir al médico en un futuro próximo, pero serán útiles para avisar de posibles problemas que precisen atención. Otros detectores adoptan la forma de comprimidos ingeribles con sensores. Son los llamados dispositivos microbioelectrónicos, que se están desarrollando para identificar ADN canceroso, gases emitidos por microbios intestinales, hemorragias gástricas, la temperatura corporal o niveles de oxígeno. Los sensores transmiten los datos a los programas informáticos para su grabación.

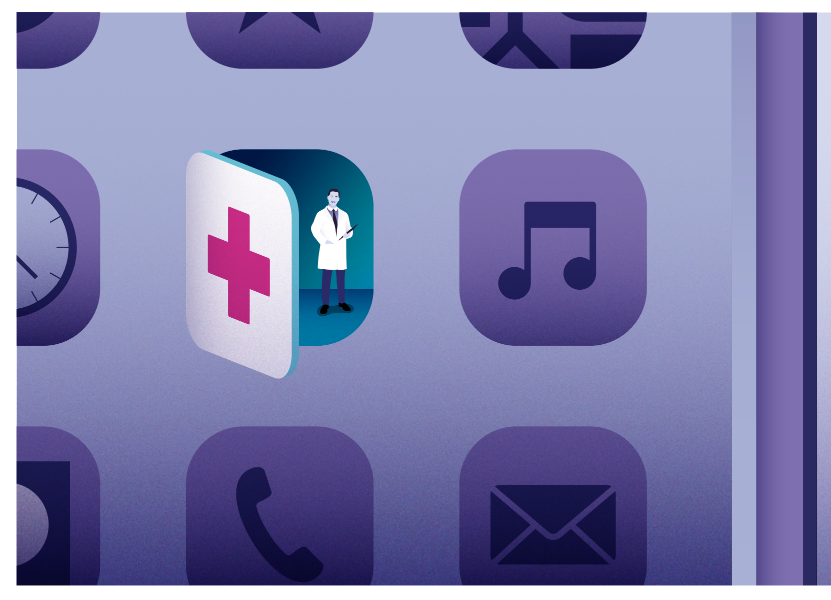
Asimismo, se diseñan aplicaciones terapéuticas para diferentes enfermedades. La primera terapia digital sujeta a prescripción médica autorizada por la FDA fue la técnica reSET de Pear Therapeutics para el trastorno por consumo de drogas. Aprobada en 2018 como complemento a la atención de un profesional sanitario, reSET presta terapia cognitivo-conductual las 24 horas del día durante los siete días de la semana y ofrece a los médicos datos en tiempo real sobre las ansias de los pacientes por tomar drogas y los factores que desencadenan su consumo. Somryst, una aplicación de terapia para el insomnio, y EndeavorRX, la primera terapia administrada en forma de videojuego para niños con trastorno por déficit de atención con hiperactividad, recibieron la aprobación de la FDA a principios del año pasado.

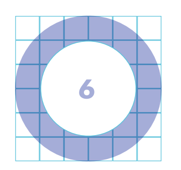
De cara al futuro, Luminopia, una empresa emergente de salud infantil, ha diseñado una aplicación de realidad virtual para tratar la ambliopía (ojo vago) como alternativa al parche ocular. Es posible que un día los estudiantes universitarios reciban alertas en su reloj inteligente para proponerles que busquen ayuda por depresión leve tras haber detectado en ellos modificaciones en el habla y en los patrones de socialización; podrían recurrir entonces al robot conversacional Woebot para recibir terapia cognitivo-conductual.

No todas las aplicaciones de bienestar pueden calificarse de medicinas digitales. La mayoría de las destinadas a diagnosticar o tratar trastornos deben demostrar su seguridad y eficacia en ensayos clínicos y obtener la aprobación de las autoridades reguladoras; algunas están sujetas a prescripción médica. (El pasado abril, para ayudar con la pandemia de COVID-19, la FDA hizo excepciones temporales con productos de bajo riesgo para trastornos mentales.)

La COVID-19 ha resaltado la importancia de la medicina digital. Al extenderse la pandemia, se lanzaron decenas de aplicaciones para detectar la depresión y prestar apoyo psicológico. Además, hospitales y organismos públicos de todo el mundo pusieron en marcha variaciones del servicio Healthcare Bot de Microsoft. En lugar de mantenerse a la espera con un centro de atención telefónica o arriesgarse a acudir a al servicio de urgencias, personas preocupadas por presentar, por ejemplo, tos y fiebre hablaban con un bot que, gracias a técnicas de tratamiento del lenguaje natural, les preguntaba por los síntomas y, en función de los análisis de inteligencia artificial, explicaba las posibles causas o iniciaba una sesión de telemedicina para su evaluación por un médico. A finales de abril, los bots habían respondido más de 200 millones de consultas sobre los síntomas y tratamientos de la COVID-19. Estas intervenciones redujeron sensiblemente la presión sobre los sistemas sanitarios.

Sin duda, la sociedad debe avanzar con cautela hacia el futuro de la medicina digital, al tiempo que vela por que las herramientas se sometan a un riguroso examen, protejan la privacidad y se integren paulatinamente a los procedimientos de trabajo de los médicos. Con la adopción de tales salvaguardas, el fenotipado y los tratamientos digitales ahorrarán costes de la atención, ya que señalarán los comportamientos no saludables y ayudarán a las personas a realizar cambios antes de que se manifieste la enfermedad. Además, el empleo de la inteligencia artificial en los ingentes conjuntos de datos que generarán las aplicaciones de fenotipado y tratamiento digitales contribuirá a personalizar la atención del paciente. Las pautas que surjan también ofrecerán a los investigadores ideas novedosas sobre la mejor manera de crear hábitos más saludables y prevenir enfermedades.





TRANSPORTE

Aviación eléctrica

VUELOS QUE PROMUEVEN LA DESCARBONIZACIÓN

Por Katherine Hamilton y Tammy Ma

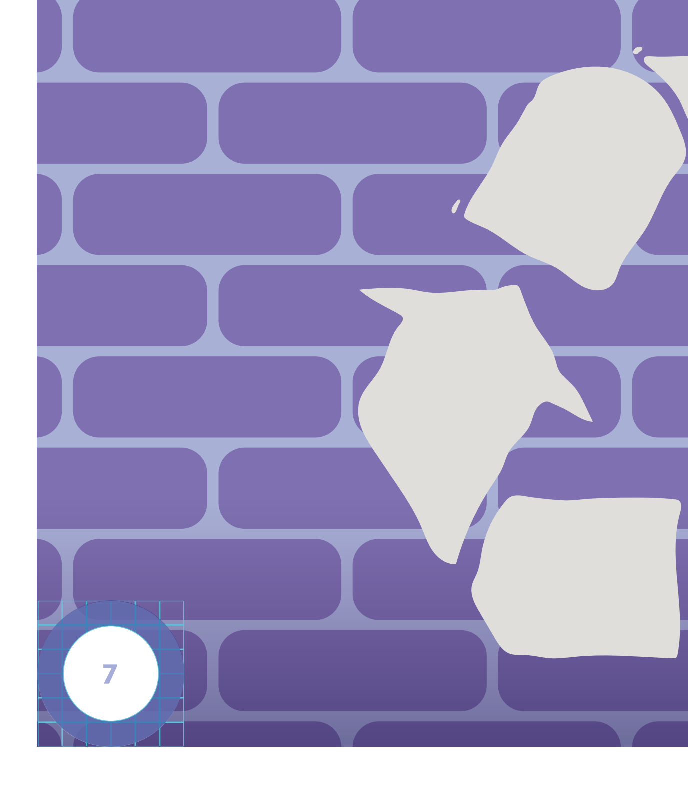
En 2019, el sector de la aviación fue responsable del 2,5 por ciento de las emisiones mundiales de carbono, y esa cifra podría triplicarse para el año 2050. Aunque algunas aerolíneas han empezado a compensar sus contribuciones a la contaminación atmosférica, aún se precisan recortes considerables. Los aviones eléctricos podrían ofrecer una transformación de la magnitud requerida, y muchas compañías se han lanzado a desarrollarlos. Además de eliminar las emisiones directas de carbono, los motores de propulsión eléctrica podrían reducir los costes de combustible hasta en un 90 por ciento, el mantenimiento hasta en un 50 por ciento y el ruido en casi un 70 por ciento.

Entre las compañías que exploran los vuelos eléctricos figuran Airbus, Ampaire, MagniX y Eviation. Todas ellas están realizando pruebas de vuelo con aeronaves destinadas a viajes cortos, privados o corporativos, y buscan la certificación de la Administración Federal de Aviación de EE.UU. Cape Air, una de las mayores aerolíneas regionales de ese país, espera ser de los primeros clientes y planea adquirir el avión eléctrico Alice de Eviation, con capacidad para 9 pasajeros. A Dan Wolf, director ejecutivo de Cape Air, no le mueven solo los beneficios ambientales, sino también el ahorro en los costes de operación. Y es que los motores eléctricos suelen durar más que los que usan hidrocarburos: necesitan una revisión cada 20.000 horas, en vez de cada 2000.

Y no se trata únicamente de los motores que propulsan la aeronave: el avión eléctrico X-57 Maxwell de la NASA, en fase de desarrollo, sustituye las alas habituales por otras más cortas que incorporan un conjunto de hélices eléctricas. En los reactores habituales, las alas deben tener suficiente envergadura para proporcionar sustentación cuando el avión vuela despacio, pero la elevada área superficial añade resistencia a velocidades altas. Las hélices eléctricas aumentan la sustentación durante el despegue, lo que permite usar alas más pequeñas y eficientes.

De momento, los aviones eléctricos se verán limitados por la distancia que pueden recorrer. Las mejores baterías actuales producen mucha menos energía por peso que los combustibles tradicionales: una densidad energética de 250 vatios-hora por kilogramo frente a los 12.000 de los combustibles de aviación. Así que cualquier vuelo requeriría baterías mucho más pesadas y voluminosas que el combustible ordinario. Aproximadamente la mitad de los vuelos mundiales cubren menos de 800 kilómetros, una distancia que podría estar al alcance de los aviones eléctricos impulsados por baterías hacia el año 2025.

La aviación eléctrica se enfrenta a obstáculos económicos y normativos, pero los inversores, incubadoras de empresas, compañías y Gobiernos, entusiasmados por los avances de esta tecnología, han apostado fuerte por su desarrollo: entre 2017 y 2019, las empresas emergentes del sector recibieron en torno a 200 millones de euros. En la actualidad hay en marcha unos 170 proyectos relacionados con aviones eléctricos. La mayoría están pensados para viajes privados, corporativos y regionales, pero Airbus prevé tener modelos de 100 pasajeros listos para volar en el año 2030.



INGENIERÍA

Cemento menos contaminante

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN QUE COMBATEN EL CAMBIO CLIMÁTICO

Por Mariette DiChristina

El hormigón es el material artificial más usado y da forma a buena parte de nuestro mundo. Y la fabricación de uno de sus principales componentes, el cemento, genera una cantidad sustancial, aunque a menudo subestimada, de dióxido de carbono antropogénico: hasta el 8 por ciento del total mundial, según el centro de estudios londinense Chatham House. Se ha afirmado que si la producción de cemento fuera un país, sería el tercero con más emisiones tras China y Estados Unidos. En la actualidad se generan 4000 millones de toneladas de cemento al año, pero se prevé que la creciente urbanización eleve esa cifra hasta los 5000 millones de toneladas en los próximos 30 años, según Chatham House. Las emisiones proceden de los combustibles fósiles que aportan el calor necesario para formar el cemento, así como del proceso químico que convierte la piedra caliza en clínker, un material que luego se muele y se mezcla con otros para obtener el producto final.

Aunque el sector de la construcción suele ser reticente a los cambios (por motivos de seguridad y fiabilidad, entre otros), la presión para que reduzca su contribución al cambio climático podría acelerar su transformación. En 2018, la Asociación Global del Cemento y el Hormigón, que representa en torno al 30 por ciento de la producción mundial, anunció las primeras directrices de sostenibilidad de la industria: un conjunto de mediciones

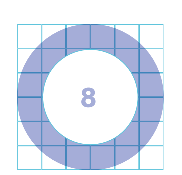


clave, como las emisiones o el consumo de agua, dirigidas a controlar y visibilizar las mejoras en el desempeño.

Entretanto se estudian diversas estrategias para disminuir las emisiones, y algunas ya se están aplicando. Solidia, una empresa emergente de Nueva Jersey, emplea un proceso químico patentado por la Universidad Rutgers que reduce en un 30 por ciento el dióxido de carbono liberado al fabricar el cemento. La receta usa más arcilla, menos caliza y menos calor que los métodos habituales. CarbonCure, en Nueva Escocia, mineraliza el dióxido de carbono generado en otros procesos industriales y lo almacena en el hormigón, evitando que acabe en la atmósfera. CarbiCrete, en Montreal, prescinde del cemento en el hormigón y lo sustituye por «escorias de acería», un subproducto de la fabricación del acero. Y Norcem, una gran cementera de Noruega, pretende convertir una de sus fábricas de cemento en la primera del mundo con cero emisiones. La planta ya emplea combustibles alternativos derivados de residuos y espera incorporar técnicas de captura y almacenamiento de carbono para eliminar todas las emisiones antes de 2030.

Además, algunos investigadores han añadido bacterias al hormigón para absorber dióxido de carbono del aire y mejorar sus propiedades. Una de las empresas emergentes que exploran materiales de construcción «vivos» es BioMason, de Carolina del Norte, que «cultiva» ladrillos de aspecto cementoso a partir de bacterias y materiales granulares conocidos como áridos. Y en un estudio financiado por la Agencia de Proyectos Avanzados del Departamento de Defensa de EE.UU. y descrito el año pasado en la revista *Matter*, un grupo de la Universidad de Colorado en Boulder empleó cianobacterias para elaborar un hormigón más respetuoso con el ambiente. Para ello, inocularon esas bacterias fotosintéticas en una estructura de arena e hidrogel, y crearon así ladrillos capaces de reparar sus propias grietas.

No es posible emplear esos ladrillos en vez del cemento y el hormigón en todas las aplicaciones actuales, pero algún día podrían sustituir a los materiales que soportan una carga ligera, como los empleados en baldosas, fachadas y estructuras temporales.



COMPUTACIÓN

Detección cuántica

METROLOGÍA DE ALTA PRECISIÓN BASADA EN LAS PECULIARIDADES DEL MUNDO SUBATÓMICO

Por Carlo Ratti

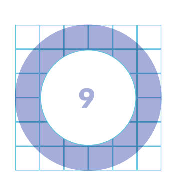
Aunque los ordenadores cuánticos acaparen la atención, los sensores cuánticos podrían ser igual de revolucionarios y abrir la puerta a vehículos autónomos capaces de «ver» tras las esquinas, sistemas de navegación subacuática, sistemas de alerta temprana de erupciones volcánicas y terremotos, y escáneres portátiles que monitoricen la actividad cerebral en nuestro día a día.

Los sensores cuánticos alcanzan una enorme precisión aprovechando la naturaleza cuántica de la materia; por ejemplo, tomando como unidad básica la diferencia entre electrones que ocupan distintos estados de energía. Los relojes atómicos ilustran este principio: nuestro patrón de tiempo se basa en el hecho de que los electrones de los átomos de cesio 133 realizan una cierta transición 9.192.631.770 veces por segundo, y esa oscilación sirve de referencia para sincronizar los demás relojes. Otros sensores cuánticos usan las transiciones atómicas para detectar ligeros cambios de movimiento o diferencias mínimas en los campos gravitatorios, eléctricos y magnéticos.

Pero hay otros modos de construir un sensor cuántico. Así, un grupo de la Universidad de Birmingham pretende usar átomos ultrafríos en caída libre para detectar pequeñas variaciones de la gravedad local. Este tipo de gravímetro cuántico sería capaz de descubrir tuberías o cables enterrados sin necesidad de cavar, y los barcos podrían emplear una técnica similar para localizar objetos submarinos.

La mayoría de los sistemas de detección cuánticos aún son caros, voluminosos y complejos, pero una nueva generación de sensores más pequeños y asequibles debería ampliar su ámbito de aplicación. El año pasado, investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts utilizaron métodos ordinarios de fabricación para integrar un sensor cuántico basado en diamantes en un chip de silicio, alojando varios componentes que suelen ser voluminosos en un cuadrado de unas décimas de milímetro de lado. Ese prototipo supone un paso hacia la producción masiva de sensores cuánticos de bajo coste, capaces de operar a temperatura ambiente y aplicables a cualquier problema que implique medir campos magnéticos débiles con precisión.

Los sistemas cuánticos son muy sensibles a las perturbaciones, lo que podría limitar su uso a entornos controlados. Pero Gobiernos e inversores privados están aportando dinero para solventar este y otros retos, como los relativos al coste, la escala y la complejidad; el Reino Unido, por ejemplo, ha destinado 350 millones de euros a la segunda fase de su Programa Nacional de Computación Cuántica (2019-2024). Los analistas de la industria esperan que los sensores cuánticos lleguen al mercado en un plazo de tres a cinco años, inicialmente enfocados a aplicaciones médicas y de defensa.



ENERGÍA

Hidrógeno verde

UNA ENERGÍA LIBRE DE CARBONO COMO COMPLEMENTO A LA EÓLICA Y LA SOLAR

Por Jeff Carbeck

Hace decenios que se piensa en el hidrógeno como una atractiva fuente de energía limpia, dado que el único subproducto de su combustión es el agua. Sin embargo, el proceso tradicional para generar hidrógeno, que consiste en exponer combustibles fósiles a vapor de agua, dista mucho de ser limpio. El hidrógeno producido de ese modo se denomina hidrógeno gris, o hidrógeno azul si se captura y secuestra el CO_2 liberado.

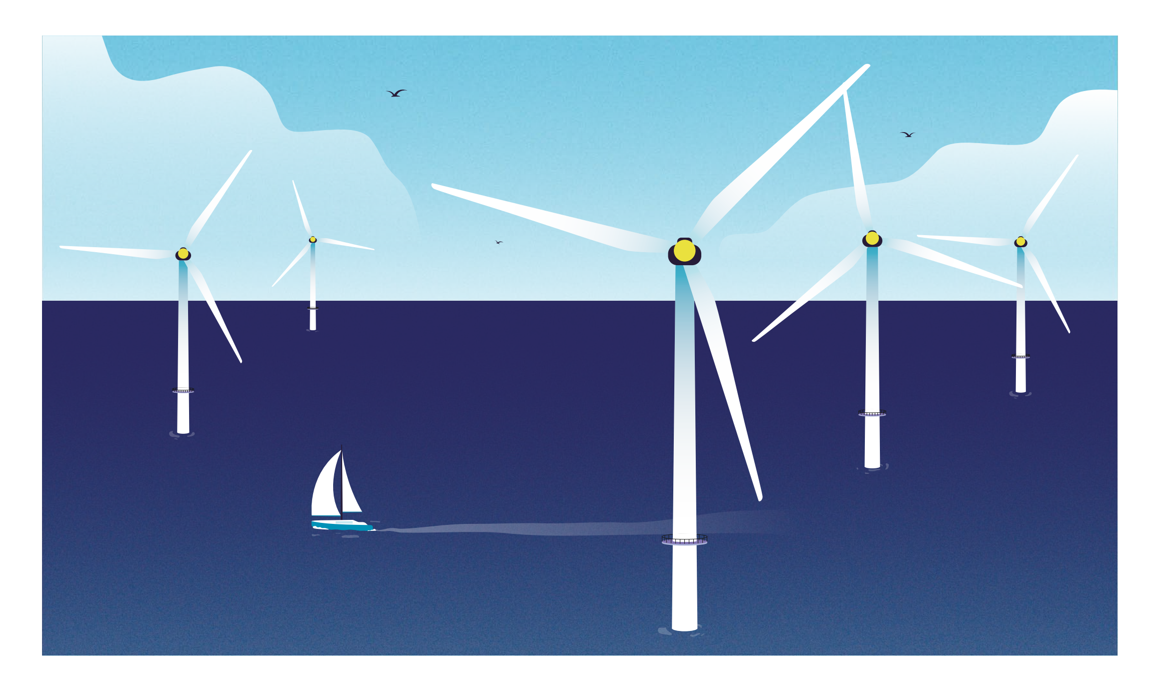
El hidrógeno verde es muy distinto. Se obtiene mediante electrólisis, un proceso que divide el agua en hidrógeno y oxígeno sin generar subproductos. En el pasado, la electrólisis requería tanta electricidad que no tenía sentido producir hidrógeno por esa vía. Pero la situación está cambiando por dos motivos. En primer lugar, existe un importante exceso de electricidad de origen renovable que la red de suministro no puede absorber; en vez de almacenarla en baterías, es posible emplearla para provocar la electrólisis del agua, con lo que se «almacena» en forma de hidrógeno. Y en segundo lugar, los electrolizadores son cada vez más eficientes.

Las compañías energéticas buscan desarrollar electrolizadores capaces de producir hidrógeno verde tan barato como el hidrógeno gris o el azul, y los analistas creen que lo lograrán en la próxima década. Entretanto, ya han empezado a integrar electrolizadores en proyectos de energía renovable. Por ejemplo, un consorcio de empresas ha impulsado el proyecto Gigastack, que instalará 100 megavatios de electrolizadores en el parque eólico marino Hornsea Two, en el Reino Unido, para generar hidrógeno verde a escala industrial.

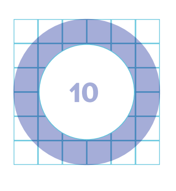
Las energías renovables actuales, como la solar y la eólica, pueden descarbonizar el sector energético hasta en un 85 por ciento al sustituir el gas y el carbón por electricidad limpia. Otras actividades económicas, como el transporte y la industria, son más difíciles de electrificar porque a menudo requieren combustibles de elevada densidad energética o un aporte de calor a alta temperatura. El hidrógeno verde tiene un gran potencial en esas áreas. La Comisión de Transiciones Energéticas, un grupo industrial, afirma que el hidrógeno verde es una de las cuatro técnicas necesarias para cumplir el objetivo del Acuerdo de París de disminuir en más de 10 gigatoneladas al año el dióxido de carbono procedente de los sectores más problemáticos, entre los que se cuentan la minería, la construcción y la industria química.

Aunque el hidrógeno verde aún está en sus comienzos, los países (sobre todo los que disponen de energía renovable barata) están invirtiendo en él. Australia pretende exportar el hidrógeno que produciría gracias a su gran capacidad solar y eólica. Chile tiene planes para las regiones áridas del norte, donde abunda la energía solar. Y China aspira a poner en circulación un millón de vehículos con pilas de combustible de hidrógeno para el año 2030.

Hay proyectos similares en marcha en Corea del Sur, Malasia, Noruega y EE.UU., donde California se ha propuesto retirar los autobuses propulsados por combustibles fósiles antes del año 2040. Y la Comisión Europea acaba de adoptar una nueva estrategia del hidrógeno con la meta de aumentar la potencia de electrolizadores desde los 0,1 gigavatios actuales hasta los 500 gigavatios en 2050. En vista de todo ello, Goldman Sachs vaticinó el año pasado que el mercado del hidrógeno verde moverá 12.000 millones de dólares para el año 2050.







BIOLOGÍA SINTÉTICA

Síntesis del genoma completo

INGENIERÍA DE CÉLULAS CADA VEZ MÁS COMPLEJAS

Por Andrew Hessel y Sang Yup Lee

En los inicios de la pandemia de la COVID-19, científicos chinos volcaron la secuencia genética del virus (las instrucciones para su replicación) en bases de datos genómicas. Más tarde, un grupo suizo sintetizó el genoma completo y produjo el virus a partir de él; básicamente, crearon el virus en el laboratorio para estudiarlo sin esperar a recibir muestras físicas. La velocidad del proceso constituye solo un ejemplo de cómo la reproducción del material genético favorece el avance de la medicina y otras disciplinas.

La síntesis del genoma completo nace como una extensión del floreciente campo de la biología sintética. Los investigadores se valen de aplicaciones informáticas para diseñar secuencias de genes que luego preparan e insertan en un microorganismo; de ese modo, consiguen reprogramarlo para que desempeñe la función deseada, como fabricar un nuevo fármaco. Hasta ahora se han realizado principalmente ligeras ediciones del genoma. Sin embargo, las mejoras en los programas y las técnicas de síntesis posibilitan una reproducción de segmentos cada vez más amplios de material genético y modificaciones extensas del genoma.

Los genomas víricos, que son pequeños, empezaron a sintetizarse en 2002; los aproximadamente 7500 nucleótidos (letras del código genético) del poliovirus llegaron primero. Como ha ocurrido en el caso del nuevo coronavirus, estos genomas víricos sintetizados han ayudado a comprender los mecanismos por los que dichos virus se propagan y causan enfermedades. De igual forma, algunos se diseñan para servir en la elaboración de vacunas e inmunoterapias.

Asimismo, la síntesis de genomas que contienen millones de nucleótidos, como los de bacterias y levaduras, resulta cada vez más manejable. En 2019, un grupo de investigadores reprodujo una versión del genoma de *Escherichia coli* que dejaba espacio para códigos que podrían obligar a la bacteria a obedecer las órdenes dadas por los científicos. Otro equipo ha obtenido una versión inicial del genoma de la levadura de la cerveza, que consta de casi 11 millones de letras del código. El diseño y la síntesis de genomas a esta escala propiciarán que los microorganismos se comporten como factorías para producir no solo fármacos, sino una miríada de sustancias. Podrían modificarse para fabricar de manera sostenible productos químicos, combustibles y nuevos materiales de construcción a partir de biomasa no alimentaria o de gases residuales como el dióxido de carbono.

Numerosos científicos anhelan la capacidad de sintetizar genomas más grandes, como los de plantas, animales y humanos. Para alcanzar esa meta se requiere una mayor inversión en programas de diseño (integrando probablemente herramientas de inteligencia artificial) y en métodos más rápidos y asequibles para sintetizar y ensamblar secuencias de ADN de millones de nucleótidos de longitud. Con la precisa financiación, la posibilidad de sintetizar genomas a una escala superior podría convertirse en una realidad antes de que acabe la década. Los investigadores ya conciben aplicaciones diversas, entre las que se incluyen el diseño de plantas resistentes a los patógenos y una línea celular humana ultrasegura —inmune, por ejemplo, a las infecciones víricas, al cáncer y a los efectos de la radiación—, que podría sustentar la base del desarrollo de terapias celulares o procesos de bioproducción. La opción de escribir nuestro propio genoma surgirá inevitablemente, lo que permitirá a los médicos curar un gran número de enfermedades genéticas, si no todas.

Existe, sin duda, el riesgo de que el diseño de genomas completos se emplee para fines indebidos; el temor principal radica en el uso armamentístico de patógenos o de las toxinas que estos puedan generar. Científicos e ingenieros habrán de idear filtros exhaustivos de seguridad biológica: una combinación de técnicas nuevas con las ya existentes para detectar y controlar en tiempo real la aparición y difusión de amenazas. Los investigadores tendrán que concebir tipos de pruebas que puedan adaptarse con rapidez a distintas escalas. Y será fundamental que los Gobiernos de todo el mundo cooperen mucho más que en la actualidad.

El consorcio del Proyecto de Síntesis del Genoma (Genome Project-write), creado en 2016, se halla en disposición de facilitar esta red de seguridad. La iniciativa engloba a cientos de científicos, ingenieros y especialistas en ética procedentes de más de una docena de países que desarrollan técnicas, comparten buenas prácticas, llevan a cabo proyectos piloto y exploran las implicaciones éticas, legales y sociales.

EN NUESTRO ARCHIVO

Hojas artificiales. Antonio Regalado en *IyC*, diciembre de 2010.

Simulación de una célula viva. Markus W. Covert en *IyC*, marzo de 2014.

La célula invulnerable. Rowen Jacobsen en *IyC*, febrero de 2020.

La solución del H_2. Peter Fairley en *IyC*, abril de 2020.



REDES SOCIALES

LA ECONOMÍA DE LA ATENCIÓN

Comprender el modo en que los algoritmos y los manipuladores explotan nuestras vulnerabilidades cognitivas nos ayuda a defendernos

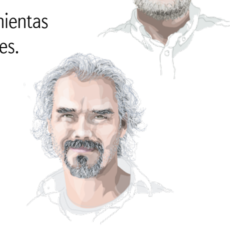
Filippo Menczer y Thomas Hills

Ilustración de Cristina Spanò


+B
i+i

Filippo Menczer es profesor de informática y ciencias de la computación y director del Observatorio de Redes Sociales en la Universidad de Indiana en Bloomington. Estudia la propagación de la desinformación y desarrolla herramientas para contrarrestar la manipulación en las redes sociales.

Thomas Hills es profesor de psicología y director del máster de Ciencias del Comportamiento y de los Datos en la Universidad de Warwick. Su investigación se centra en la evolución de la mente y de la información.



A Andy le preocupa contraer la COVID-19. Incapaz de leer todos los artículos que ve sobre el tema, busca consejo en sus amigos de confianza. Cuando uno opina en Facebook que el miedo a la pandemia es exagerado, Andy descarta esa idea. Pero entonces el hotel donde trabaja cierra sus puertas y, al ver peligrar su trabajo, Andy empieza a preguntarse cuán seria es en realidad la amenaza del nuevo virus. Después de todo, no conoce a nadie que haya muerto por contagiarse. Un compañero de trabajo comparte un artículo que sostiene que el «pánico» a la COVID-19 lo han pergeñado las grandes farmacéuticas en connivencia con los políticos corruptos, lo que encaja con los recelos de Andy hacia el Gobierno. Una búsqueda en Internet le lleva enseguida a páginas que afirman que la COVID-19 no es peor que la gripe. Andy se une a un grupo virtual de personas que han sido despedidas o temen que eso suceda y pronto se cuestiona, como muchos de ellos, si la pandemia es real. Cuando se entera de que varios de sus nuevos amigos piensan participar en una manifestación en contra de los confinamientos, decide acompañarlos. Casi ninguno de los asistentes a la protesta masiva lleva mascarilla, y él tampoco. Más tarde su hermana le pregunta sobre la manifestación, y Andy le transmite una convicción que ya forma parte de su identidad: la COVID-19 es un engaño.

Este ejemplo ilustra una profusión de sesgos cognitivos. Preferimos la información que procede de personas en las que confiamos, nuestro «endogrupo». Prestamos más atención a la información sobre riesgos (el de perder el trabajo, en el caso de Andy) y somos más propensos a compartirla. Buscamos y recordamos cosas que encajan con lo que ya sabemos y entendemos. Estos sesgos son producto de nuestro pasado evolutivo y nos han ayudado durante decenas de miles de años: quienes se comportaban de acuerdo a ellos (por ejemplo, no acercándose a la orilla de un estanque donde alguien afirmaba haber visto una víbora) tenían más probabilidades de sobrevivir.

Sin embargo, las nuevas tecnologías amplifican esos sesgos de manera perniciosa. Los motores de búsqueda dirigen a Andy a páginas que exacerban sus sospechas, y las redes sociales le conectan con gente que piensa como él, dando pábulo a sus miedos. Para empeorar las cosas, los bots (cuentas automatizadas que se hacen pasar por personas) permiten que actores mal informados o malintencionados se aprovechen de sus vulnerabilidades.

La proliferación de la información en línea agrava el problema. Ver y crear blogs, vídeos, tuits y memes se ha vuelto tan fácil y asequible que el mercado de la información está inunda-

EN SÍNTESIS

La proliferación de la información reduce su calidad, y las redes sociales amplifican nuestros sesgos cognitivos de un modo nocivo. Eso nos hace vulnerables a la polarización y la manipulación.

Para protegernos contra los engaños y restablecer la salud del ecosistema informativo, resulta esencial comprender esas vulnerabilidades cognitivas y cómo las explotan los algoritmos y bots.

Las herramientas informáticas pueden ayudarnos a detectar cuentas falsas o a visualizar la propagación de bulos, pero para poner freno a la desinformación harán falta cambios institucionales.

do de ellos. Incapaces de procesar todo ese material, dejamos que nuestros sesgos cognitivos decidan dónde debemos dirigir nuestra atención, y estos atajos mentales influyen de forma perjudicial en qué tipo de información buscamos, comprendemos, recordamos y repetimos.

Es urgente entender esas vulnerabilidades cognitivas y cómo las usan o manipulan los algoritmos. Nuestros equipos en la Universidad de Warwick y en el Observatorio de Redes Sociales (OSoMe, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Indiana en Bloomington emplean experimentos cognitivos, simulaciones, minería de datos e inteligencia artificial para comprender las vulnerabilidades de los usuarios de redes sociales. Los estudios psicológicos sobre la evolución de la información que se realizan en Warwick sirven de guía para los modelos informáticos diseñados en Indiana, y viceversa. También desarrollamos herramientas analíticas y de aprendizaje automático para luchar contra la manipulación en las redes sociales. Algunas de ellas ya ayudan a periodistas, organizaciones de la sociedad civil y ciudadanos de a pie a detectar actores falsos, visualizar la propagación de bulos y fomentar la alfabetización en materia de noticias.

SOBRECARGA DE INFORMACIÓN

El exceso de información ha generado una intensa competencia por la atención de la gente. Como afirmó Herbert A. Simon, economista y psicólogo galardonado con el premio Nobel, «lo que la información consume es bastante obvio: consume la atención de sus destinatarios». Una de las primeras consecuencias de esta «economía de la atención» es la pérdida de la información de calidad. El equipo del OSoMe demostró este efecto a través de un conjunto de simulaciones sencillas, que representan a los usuarios de redes sociales, o «agentes» (como Andy), mediante nodos en una red de conocidos virtuales. En cada paso de la simulación, un agente puede crear un meme o compartir uno que vea en un canal de noticias (*news feed*). Para recrear la atención limitada, los agentes solo pueden ver un cierto número de noticias situadas al principio de sus canales.

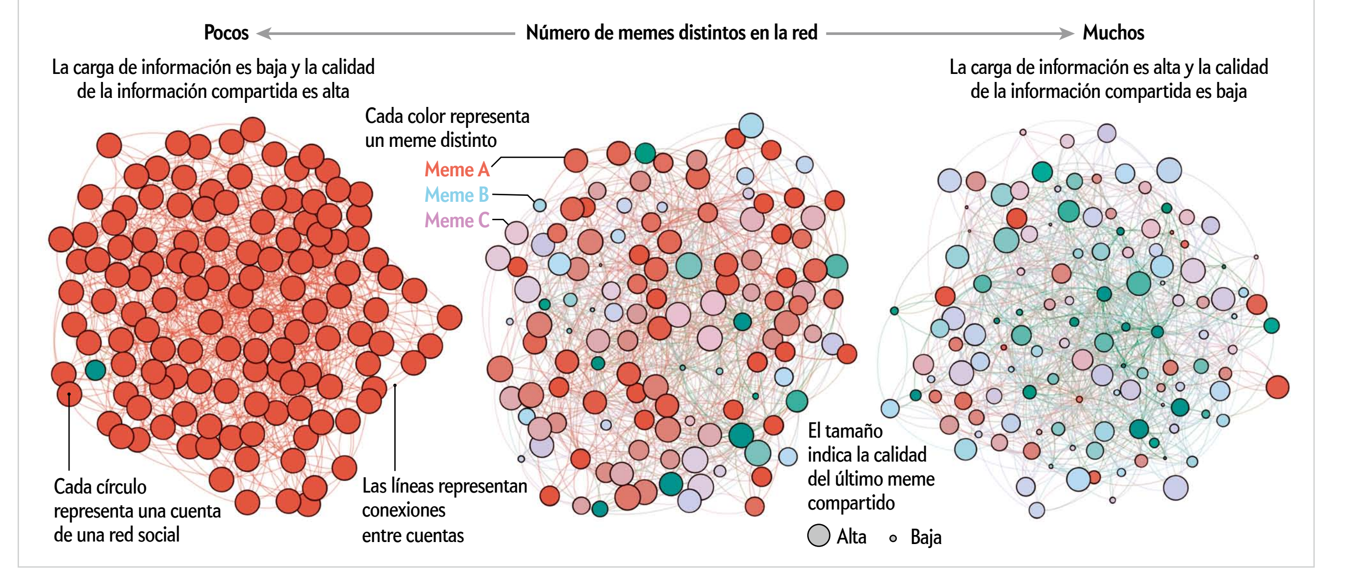
Lilian Weng, del OSoMe, ejecutó muchos pasos de esa simulación y descubrió que, al restringir cada vez más la atención de los agentes, la propagación de los memes venía a reflejar la distribución de ley de potencias de las redes sociales reales: la probabilidad de que un meme fuera compartido un cierto número de veces era aproximadamente una potencia inversa de ese número. Por ejemplo, la probabilidad de que un meme se compartiera tres veces era unas nueve veces inferior a la de que se compartiera una vez.

Ese patrón de popularidad de los memes, donde la mayoría pasan casi desapercibidos mientras unos pocos alcanzan una gran difusión, no se debía a que algunos fueran más pegadizos o más valiosos: los memes de este mundo simulado no poseían ninguna cualidad intrínseca. La viralidad era una consecuencia estadística de la proliferación de información en una red social compuesta por agentes con una atención limitada. Xiaoyan Qiu, por entonces investigadora del OSoMe, observó que la calidad general de los memes más populares no aumentaba demasiado aunque los agentes compartieran preferentemente los memes de mayor calidad. Nuestros modelos revelaron que, incluso si queremos ver y compartir información de calidad, el no poder abarcar todo lo que aparece en nuestros canales de noticias nos conduce de manera inevitable a compartir contenidos parcial o totalmente falsos.

ECONOMÍA DE LA ATENCIÓN

Sobrecarga de información

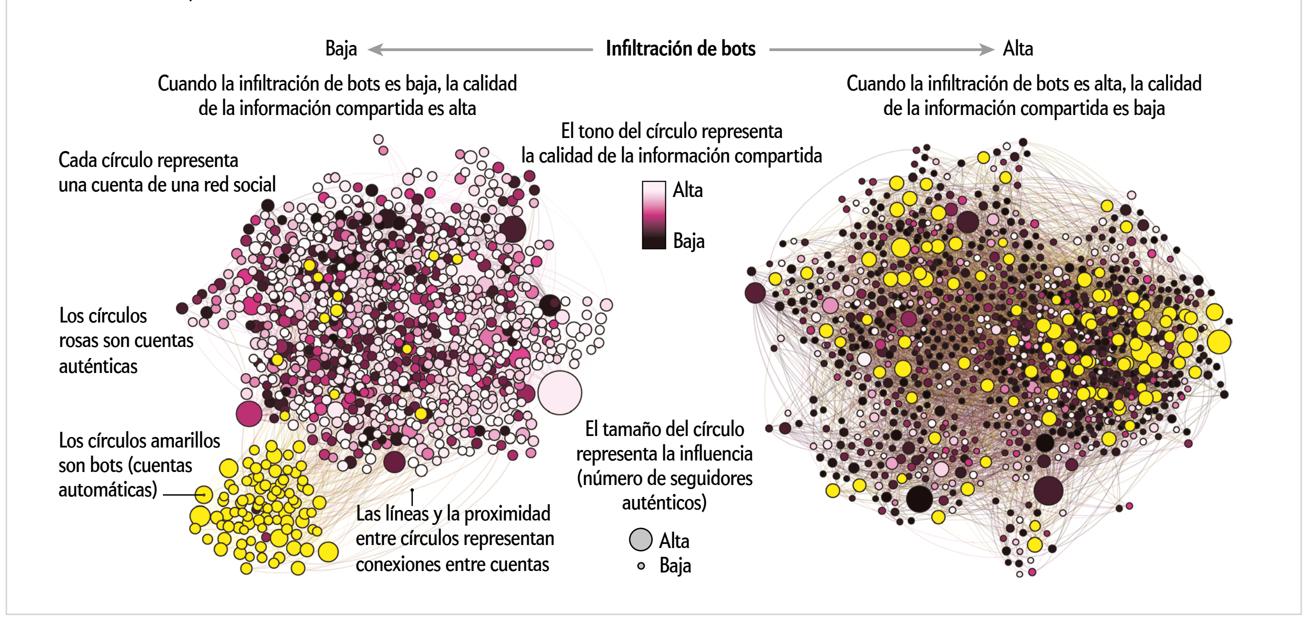
Nuestros canales de noticias (*news feeds*) en las redes sociales suelen estar tan llenos que solo podemos ver las primeras publicaciones, entre las que elegimos cuáles compartir. Los investigadores del Observatorio de Redes Sociales (OSoMe) de la Universidad de Indiana en Bloomington simularon esta capacidad limitada de prestar atención. En su modelo, cada nodo de la red representa un usuario, unido por líneas a amigos o seguidores que reciben el material que comparte. A medida que aumenta el número de memes en la red (*hacia la derecha*), cae la calidad de los que más se propagan (*los círculos son más pequeños*). Así, la mera sobrecarga de información puede explicar por qué se vuelven virales los bulos.



FUENTE: «LIMITED INDIVIDUAL ATTENTION AND ONLINE VIRALITY OF LOW-QUALITY INFORMATION», XIAOYAN QIU ET AL. EN *NATURE HUMAN BEHAVIOUR*, VOL. 1, ART. 132, JUNIO DE 2017. (*Los autores retiraron este artículo debido a algunos errores de cálculo que no afectan a la gráfica o conclusiones aquí expuestas. La versión corregida puede consultarse en arxiv.org/abs/1701.02694*)

Bots y desinformación

Los bots, cuentas automáticas que se hacen pasar por personas, reducen mucho la calidad de la información en una red social. En una simulación, los investigadores del OSoMe incluyeron bots en la red, modelizados como agentes que solo comparten memes de calidad cero y solo se retuitean entre ellos. Hallaron que la calidad de la información es alta cuando menos de un 1 por ciento de los usuarios humanos sigue a bots (*izquierda*). Pero si la infiltración de los bots supera el 1 por ciento, la información de baja calidad se propaga a través de la red (*derecha*). En las redes sociales reales, unos cuantos votos positivos tempranos por parte de bots pueden hacer que una noticia falsa se vuelva viral.



Los sesgos cognitivos agravan enormemente el problema. En un conjunto de innovadores estudios realizados en 1932, el psicólogo Frederic Bartlett les relató a unos voluntarios una leyenda de los indios norteamericanos sobre un joven que oía gritos de guerra y, al ir en su busca, intervenía en una batalla onírica que acababa provocando su muerte real. Bartlett pidió a los participantes, que no eran de origen indio, que recordaran esa confusa historia a intervalos de tiempo crecientes, desde minutos a años después de escucharla. Y constató que, conforme pasaba el tiempo, los voluntarios tendían a distorsionar las partes de la historia ajenas a su cultura, olvidándolas o transformándolas en algo más familiar. Ahora sabemos que nuestra mente hace eso constantemente: ajusta nuestra comprensión de cualquier nueva información para que encaje con lo que ya sabemos. Una consecuencia de este «sesgo de confirmación» es que la gente a menudo busca, recuerda y entiende la información que ratifica sus creencias previas.

Esa tendencia es muy difícil de corregir. Los experimentos muestran que tendemos a hallar pruebas que respaldan lo que ya pensábamos incluso cuando recibimos información equilibrada que refleja distintos puntos de vista. Y si exponemos a personas con opiniones discrepantes acerca de asuntos con una fuerte carga emocional, como el cambio climático, a la misma información relacionada con esos temas, se reafirman aún más en sus posiciones iniciales.

Para colmo de males, los motores de búsqueda y las redes sociales ofrecen recomendaciones personalizadas basadas en la miríada de datos que poseen sobre las preferencias pasadas de sus usuarios. En nuestros canales de noticias, priorizan aquellas con las que es más probable que estemos de acuerdo (por marginales que sean) y nos blindan contra las que podrían hacernos cambiar de parecer. Y eso nos hace vulnerables a la polarización. Nir Grinberg y sus compañeros de la Universidad del Nordeste demostraron hace poco que, en Estados Unidos, los conservadores son más receptivos a la desinformación. Pero nuestro propio análisis sobre el consumo de información de baja calidad en Twitter revela que la vulnerabilidad surge a ambos lados del espectro político y nadie es completamente ajeno a ella. El sesgo político afecta incluso a nuestra capacidad para detectar la manipulación en la red, aunque de forma asimétrica: una investigación reciente muestra que los republicanos son más propensos a confundir a los bots que difunden ideas conservadoras con personas, mientras que los demócratas son más proclives a tomar a los usuarios humanos conservadores por bots.

GREGARISMO SOCIAL

En agosto de 2019, en Nueva York, la gente empezó a correr al oír lo que parecía un tiroteo. Otros les imitaron mientras gritaban: «¡Están disparando!». Más tarde se enterarían de que los sonidos provenían del tubo de escape de una motocicleta. En situaciones así, puede valer la pena correr primero y preguntar después. En ausencia de señales claras, nuestro cerebro usa información sobre la multitud para inferir qué acciones conviene llevar a cabo, un comportamiento similar al que se observa en los bancos de peces y las bandadas de pájaros.

Esa conformidad social está muy extendida. En un fascinante estudio de 2006 en el que participaron 14.000 voluntarios en línea, Matthew Salganik, por entonces en la Universidad

FILIPPO MENCZER

de Columbia, y sus colaboradores descubrieron que si podemos ver qué música están descargando los demás, acabamos bajándonos canciones parecidas. Además, cuando se aisló a los participantes en grupos «sociales», de manera que podían ver las preferencias del resto de integrantes de su círculo, pero no las de las personas ajenas a él, las elecciones de los distintos grupos divergieron rápidamente. Por contra, las preferencias de los grupos «no sociales», donde nadie conocía las elecciones de los demás, permanecieron bastante estables. En otras palabras, en los grupos sociales la presión hacia la conformidad es tan grande que puede superar las preferencias individuales y, al amplificar las diferencias aleatorias iniciales, provocar que grupos segregados diverjan a extremos opuestos.

La dinámica de las redes sociales es parecida. Confundimos popularidad con calidad y acabamos copiando el comportamiento que observamos. Los experimentos sobre Twitter realizados por Bjarke Mønsted y sus colaboradores de la Universidad Técnica de Dinamarca y la Universidad del Sur de California indican que la información se transmite mediante un «contagio complejo»: cuando estamos expuestos de manera repetida a una idea, por lo general procedente de varias fuentes, somos más propensos a adoptarla y compartirla. Este sesgo social se amplifica debido a lo que los psicólogos denominan el efecto de la mera exposición: cuando nos topamos una y otra vez con los mismos estímulos, por ejemplo ciertas caras, nos empiezan a gustar más que otros estímulos que recibimos con menor asiduidad.

Esos sesgos se traducen en una necesidad irresistible de prestar atención a la información que se ha vuelto viral: si todo el mundo habla de ello, debe de ser importante. Además de mostrarnos material que coincide con nuestras opiniones, las redes sociales como Facebook, Twitter, YouTube o Instagram sitúan el contenido más popular en la parte superior de nuestras pantallas y nos enseñan a cuántas personas les ha gustado algo y cuántas lo han compartido. Pocos de nosotros nos damos cuenta de que esos datos no proporcionan evaluaciones de la calidad independientes.

De hecho, los programadores que diseñan los algoritmos para ordenar los memes en las redes sociales dan por hecho que la «sabiduría de las masas» identificará enseguida las publicaciones de calidad: usan la popularidad como indicador de la calidad. Nuestro análisis de grandes cantidades de datos anónimos sobre clics muestra que todas las plataformas (redes sociales, motores de búsqueda y sitios de noticias) presentan de manera preferencial la información procedente de un subconjunto reducido de fuentes populares.

Para comprender los motivos, modelizamos cómo combinan los signos de calidad y popularidad en sus clasificaciones. En nuestro modelo, los agentes con una atención limitada (aquellos que solo ven un cierto número de noticias al principio de sus canales) también tienen más opciones de clicar en los memes mejor valorados por la plataforma. Cada publicación posee una calidad intrínseca, además de un nivel de popularidad determinado por la cantidad de clics que ha recibido. Otra variable explora hasta qué punto la clasificación se basa en la popularidad en vez de en la calidad. Las simulaciones del modelo revelan que ese sesgo algorítmico normalmente limita la calidad de los memes incluso en ausencia del sesgo humano. Incluso si queremos compartir la mejor información, los algoritmos acaban confundiéndonos.

La información que pasa de una persona a otra a lo largo de una cadena se vuelve más negativa y más resistente a la corrección

CAJAS DE RESONANCIA

Muchos de nosotros no creemos estar siguiendo al rebaño. Pero nuestro sesgo de confirmación nos lleva a seguir a otros que son como nosotros, una dinámica a la que a veces se denomina homofilia: la tendencia a que las personas con ideas afines se conecten entre ellas. Las redes sociales amplifican la homofilia al permitir que los usuarios alteren las estructuras de sus redes sociales a través de acciones como seguir a otro usuario o dejar de ser amigo suyo. El resultado es que la gente acaba segregada en comunidades grandes, densas y cada vez más desinformadas, habitualmente descritas como cajas de resonancia o cámaras de eco.

En el OSoMe exploramos la aparición de cajas de resonancia en línea por medio de otra simulación, Echo-Demo. En este modelo, cada agente tiene una opinión política representada por un número que va de −1 (progresista) a +1 (conservador). Estas inclinaciones se reflejan en las publicaciones de los agentes, que además están influenciados por las opiniones que ven en sus canales de noticias y pueden dejar de seguir a usuarios con ideas diferentes. Empezamos con redes y opiniones aleatorias y hallamos que la combinación de la influencia social y la posibilidad de dejar de seguir a alguien acelera notablemente la formación de comunidades polarizadas y segregadas.

De hecho, las cajas de resonancia políticas de Twitter son tan extremas que es posible predecir la ideología de cada usuario con bastante precisión: uno profesa las mismas opiniones que la mayoría de sus contactos. Esta estructura compartimentada propaga la información de manera eficaz dentro de una comunidad, a la vez que aísla ese grupo de los demás. En 2014, nuestro grupo de investigación fue objeto de una campaña de desinformación que afirmaba que formábamos parte de una estrategia política para suprimir la libertad de expresión. Esta falsa acusación se hizo viral sobre todo en la caja de resonancia conservadora, mientras que los artículos de verificación de datos que la desacreditaban circularon principalmente en la comunidad progresista. Por desgracia, lo habitual es que se produzca esta segregación entre los bulos y sus verificaciones.

Las redes sociales también pueden fomentar la negatividad. En un reciente estudio de laboratorio, Robert Jagiello, del grupo de Warwick, concluyó que la información compartida socialmente no solo refuerza nuestros sesgos, sino que también se resiste más a la corrección. Jagiello investigó cómo pasa la información de persona a persona en lo que se denomina una cadena de difusión social. En el experimento, la primera persona de la cadena leía una serie de artículos sobre la energía nuclear o los aditivos alimentarios. Estos escritos se diseñaron para resultar equilibrados, de modo que contenían

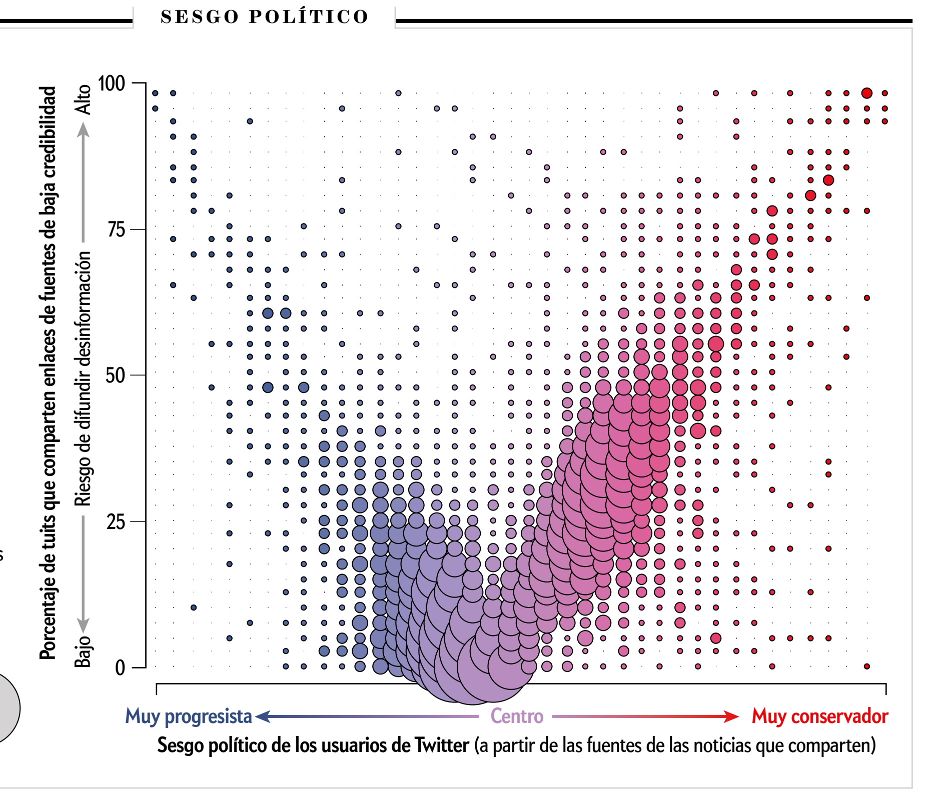
SESGO POLÍTICO

Vulnerables a los bulos

Un estudio con usuarios de Twitter que tuvo en cuenta sus preferencias políticas halló que tanto progresistas (●) como conservadores (●) acaban compartiendo información de sitios que publican regularmente noticias de baja credibilidad (a juicio de verificadores independientes). No obstante, los conservadores son algo más proclives a compartir bulos.

La gráfica muestra más de 15.000 usuarios de Twitter. El tamaño de cada punto representa el número de cuentas (entre 1 y 429) con la misma combinación de sesgo político/riesgo de difundir desinformación.

1 — 429



DIMITAR NIKOLOV Y FILIPPO MENCZER (*datos*); JEN CHRISTIANSEN (*gráfico*)

tanta información positiva (por ejemplo, acerca de una menor contaminación por carbono o alimentos menos perecederos) como negativa (relacionada con los riesgos de una catástrofe nuclear o los posibles daños a la salud).

Esa primera persona de la cadena le hablaba de los artículos a la segunda, que hacía lo mismo con la tercera, y así sucesivamente. En general, observamos que la información negativa iba aumentando a medida que fluía por la cadena, lo que se conoce como amplificación social del riesgo. Además, Danielle J. Navarro y sus colaboradores de la Universidad de Nueva Gales del Sur hallaron que la información que circula en las cadenas de difusión social es susceptible de ser distorsionada por los individuos con los sesgos más extremos.

Y lo que es peor, la difusión social también hace que la información negativa sea más persistente. Cuando Jagiello expuso a los integrantes de las cadenas de difusión a los artículos originales (los que había visto la primera persona de la cadena), la información equilibrada apenas redujo sus actitudes negativas. Al pasar de una persona a otra, la información no solo se había vuelto más negativa, sino también más resistente a las actualizaciones.

En un estudio de 2015, los investigadores del OSoMe Emilio Ferrara y Zeyao Yang analizaron datos empíricos sobre ese «contagio emocional» en Twitter y descubrieron que las personas sobreexpuestas a contenidos negativos tienden a compartir publicaciones negativas, mientras que las sobreexpuestas a contenidos positivos suelen compartir artículos más positivos. Dado que los contenidos negativos se propagan más deprisa, es fácil manipular las emociones creando relatos que desencadenen respuestas negativas, como el miedo y la ansiedad. Ferrara, actualmente en la Universidad del Sur de California, y sus colaboradores de la Fundación Bruno Kessler han puesto de manifiesto que durante el referéndum de independencia de Cataluña de 2017 se usaron bots sociales para retuitear historias violentas e incendiarias, incrementando su exposición y exacerbando el conflicto social.

EL AUGE DE LOS BOTS

Los bots sociales explotan todas nuestras lagunas cognitivas para reducir aún más la calidad de la información. Y es muy fácil crearlos: las redes sociales ofrecen interfaces de programación de aplicaciones con las que un único actor puede crear y controlar miles de bots de manera muy sencilla. Pero amplificar un mensaje, aunque sea tan solo mediante unos pocos votos positivos iniciales generados por bots en redes sociales como Reddit, puede tener un gran impacto en su popularidad.

En el OSoMe, hemos desarrollado algoritmos de aprendizaje automático para detectar los bots sociales. Uno de ellos, Botometer, es una herramienta pública que extrae 1200 atributos de cualquier cuenta de Twitter para caracterizar su perfil, sus contactos, la estructura de su red social, sus patrones temporales de actividad o su lenguaje. El programa compara esos atributos con los de decenas de miles de bots ya identificados y le asigna a la cuenta de Twitter una puntuación, que indica la probabilidad de que sea automática.

En 2017 calculamos que hasta un 15 por ciento de las cuentas de Twitter eran bots, y que habían desempeñado un papel fundamental en la propagación de la desinformación durante la campaña electoral de 2016 en Estados Unidos. Multitud de bots tuiteaban las noticias falsas (como una que vinculaba al equipo de Clinton con rituales ocultos) a los pocos segundos de publicarse, y la gente, cautivada por la aparente popularidad del contenido, las compartía.

Los bots también nos influyen haciéndose pasar por personas de nuestro endogrupo. Un bot solo tiene que seguir, dar votos positivos o retuitear a un usuario de una comunidad virtual para

infiltrarse rápidamente en ella. Xiaodan Lou, investigadora del OSoMe, desarrolló otro modelo en el que algunos de los agentes son bots que se infiltran en una red social y comparten contenido de baja calidad engañosamente atractivo (pensemos en los ciberanzuelos o *clickbaits*). Un parámetro del modelo describe la probabilidad de que un agente auténtico siga a bots, definidos como agentes que generan memes de calidad cero y solo se retuitean entre ellos. Nuestras simulaciones muestran que estos bots pueden reducir eficazmente la calidad de la información en todo el ecosistema con tan solo infiltrarse en una pequeña fracción de la red. También pueden acelerar la formación de cajas de resonancia al sugerir que sigamos a otras cuentas falsas, creando así lo que se conoce como «trenes para obtener seguidores» (*follow trains*).

Algunos manipuladores juegan con dos barajas, usando diferentes sitios de noticias falsas y bots para impulsar la polarización política o la monetización mediante publicidad. En el OSoMe hemos destapado una red de cuentas falsas en Twitter, coordinadas por un mismo usuario. Algunos de esos bots fingían ser simpatizantes de Donald Trump, y otros, detractores. Y todos ellos pedían donativos políticos. Tales operaciones amplifican contenidos que explotan nuestros sesgos de confirmación, precipitando la aparición de cajas de resonancia polarizadas.

FRENAR LA MANIPULACIÓN EN LÍNEA

Comprender nuestros sesgos cognitivos y cómo los explotan los algoritmos y los bots nos ayuda a protegernos contra la manipulación. El OSoMe ha elaborado una serie de herramientas para ayudar a la gente a identificar sus propias vulnerabilidades y los puntos débiles de las redes sociales. Una de ellas es una aplicación móvil llamada Fakey, que nos propone un juego para aprender a detectar la desinformación. El programa simula un canal de noticias que va mostrando artículos reales procedentes de fuentes de baja y alta credibilidad, y el usuario debe decidir cuáles compartir y cuáles verificar. El análisis de los datos de Fakey confirma la prevalencia del gregarismo social en línea: los usuarios son más propensos a compartir artículos de baja credibilidad cuando creen que mucha gente ha hecho lo propio.

Otro programa a disposición del público, llamado Hoaxy, muestra de manera gráfica la difusión de cualquier meme existente a través de Twitter. Los nodos representan cuentas reales de Twitter, y los enlaces ilustran cómo los retuits, citas, menciones y respuestas propagan el meme de una cuenta a otra. El color de cada nodo corresponde a su puntuación en Botometer, lo que permite comprobar hasta qué punto amplifican la desinformación los bots. Estas herramientas han servido para que los periodistas descubran el origen de campañas de desinformación como la que alentó la teoría conspirativa del «pizzagate» en Estados Unidos. Y también ayudaron a detectar un plan mediado por bots para promover la abstención en las elecciones de medio mandato de 2018 en ese mismo país. Sin embargo, detectar la manipulación se está volviendo más difícil, ya que los algoritmos de aprendizaje automático emulan cada vez mejor el comportamiento humano.

Además de propagar bulos, las campañas de desinformación también pueden desviar la atención de otros problemas más graves. Para combatir ese tipo de manipulación, hemos desarrollado una aplicación llamada BotSlayer que extrae etiquetas, enlaces, cuentas y otra información contenida en los tuits relacionados con un tema que se quiera analizar. BotSlayer rastrea los tuits y las cuentas que publican cada uno de esos atributos, para identificar aquellos que son tendencia y probablemente están siendo amplificados por bots o cuentas coordinadas. El objetivo es ayudar a los periodistas, las organizaciones de la sociedad civil y los candidatos políticos a detectar y rastrear en tiempo real las campañas de influencia impulsadas por cuentas falsas.

Tales herramientas informáticas son muy útiles, pero se requieren cambios institucionales para frenar la proliferación de noticias falsas. La educación puede ayudar, aunque no es probable que pueda abarcar todos los temas sobre los que la gente está desinformada. Algunos Gobiernos y redes sociales también tratan de tomar medidas contra la manipulación en línea y los bulos. Pero ¿quién decide lo que es falso o manipulativo y lo que no? Es posible marcar la información con avisos como los que han empezado a usar Facebook y Twitter, pero ¿podemos confiar en las personas que asignan esas etiquetas? Hay un riesgo real de que este tipo de medidas recorten de manera deliberada o inadvertida la libertad de expresión, que es fundamental en una democracia fuerte. La preponderancia de las redes sociales con alcance global y vínculos estrechos con los Gobiernos complica aún más la situación.

Quizás una de las mejores opciones sea hacer que resulte más difícil crear y compartir contenidos de baja calidad. Eso podría pasar por añadir «fricción», obligando a la gente a pagar por compartir o recibir información, ya sea en forma de tiempo, trabajo mental (por ejemplo, rompecabezas) o micropagos por suscripción o uso. Las publicaciones automáticas deberían tratarse como propaganda. Algunas plataformas ya emplean la fricción por medio de *captchas* o confirmación telefónica para acceder a las cuentas, y Twitter ha puesto límites a las publicaciones automáticas. Estos esfuerzos se podrían ampliar para ir dirigiendo los incentivos de compartir en línea hacia la información que es valiosa para los consumidores.

La comunicación gratuita tiene un precio. Al reducir el coste de la información, hemos mermado su valor y abierto la puerta a su adulteración. Para restablecer la salud del ecosistema informativo, debemos comprender las vulnerabilidades de nuestras mentes abrumadas y cómo podemos usar la economía de la atención para protegernos frente a los engaños. IyC

PARA SABER MÁS

Competition among memes in a world with limited attention. Lilian Weng et al. en *Scientific Reports*, vol. 2, art. 335, marzo de 2012.

Measuring emotional contagion in social media. Emilio Ferrara y Zeyao Yang en *PLoS ONE*, vol. 10, n.º 11, art. e0142390, noviembre de 2015.

The spread of low-credibility content by social bots. Chengcheng Shao et al. en *Nature Communications*, vol. 9, art. 4787, noviembre de 2018.

Social influence and unfollowing accelerate the emergence of echo chambers. Kazutoshi Sasahara et al. en *Journal of Computational Social Science*, 11 de septiembre de 2020.

Página web del Observatorio de Redes Sociales de la Universidad de Indiana: http://osome.iuni.iu.edu/

EN NUESTRO ARCHIVO

La era de la (des)información. Walter Quattrociocchi en *IyC*, octubre de 2016.

¿Por qué confiamos en mentiras? Cailin O'Connor y James Owen Weatherall en *IyC*, noviembre de 2019.

Ilusiones y sesgos cognitivos. Helena Matute en *IyC*, noviembre de 2019.

Caos en las redes sociales. Claire Wardle en *IyC*, noviembre de 2019.

por J. Carlos Serio Silva, Jorge Ramos Luna y M. Fernanda Álvarez Velázquez

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Un mono aullador con leucismo

El hallazgo en México de un ejemplar con esta mutación cromática supone una oportunidad única para promover la conservación de la especie

Caminar por las selvas tropicales del sur de México mientras disfrutamos de sus aromas, sonidos y colores nos ofrece la oportunidad de encontrarnos con grandes sorpresas de la naturaleza. En estas selvas viven tres especies de monos silvestres; su presencia constituye el límite más septentrional de los primates de todo el continente americano. Una de tales especies es el mono aullador negro (*Alouatta pigra*), un habitante exclusivo de la copa de los árboles y que tiene un estado de conservación vulnerable debido a la destrucción de su hábitat. Denominado localmente saraguato, este mono se distribuye geográficamente desde Tabasco, Chiapas y la península de Yucatán hasta localidades de Mesoamérica en Belice y Guatemala.

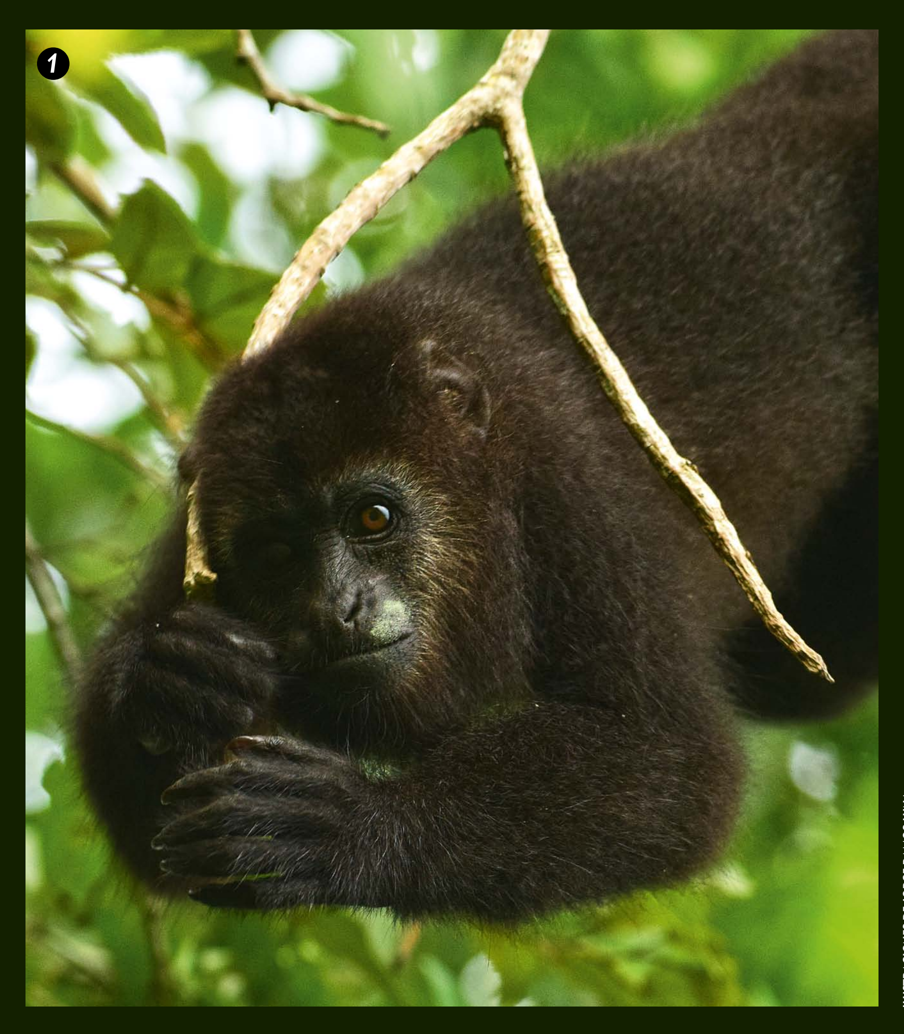
A lo largo de treinta años de investigaciones, nuestro grupo ha abordado numerosos aspectos de la historia natural del saraguato, y los hallazgos sobre él no han dejado de asombrarnos. El último ha sido el descubrimiento de un individuo con el pelaje marrón, en lugar del habitual negro, a causa una mutación parecida al albinismo denominada leucismo.

El albinismo es un trastorno cromático que se debe a la incapacidad de los melanocitos (células pigmentarias) de sintetizar melanina, el pigmento responsable del color del pelaje y los ojos. El leucismo, en cambio, se caracteriza por la ausencia total o parcial de melanocitos y no afecta al color de los ojos. El defecto puede producirse en diferentes partes del pelaje, lo que da lugar a la formación de manchas blancas de distinta extensión, o bien manifestarse de forma uniforme, lo que genera coloraciones homogéneas que van desde el blanco hasta tonalidades más claras de lo normal.

El saraguato leucístico que descubrimos corresponde a este último caso. Se trata de un macho adulto, de unos 12 o 15 años de edad y una excelente condición física, con un peso de entre 9 y 12 kilogramos. Es el primer ejemplar de esta especie con leucismo que se ha documentado, y también representa una excepción entre los vertebrados de gran tamaño.

Para conocer mejor los efectos del leucismo en este primate, hemos desplegado una estrategia de seguimiento conductual, ecológico, fisiológico y genético del grupo social al que pertenece y en el que parece ejercer un papel de líder. Nos interesa saber cómo influye su coloración y su aspecto diferente en las interacciones que mantiene con otros miembros de la especie, tanto dentro como fuera de su ámbito hogareño. Este individuo único constituye desde su descubrimiento un emblema de la primatología de Mesoamérica y puede ayudar a fomentar la conservación de los monos nativos y su hábitat, ambos en regresión.

—J. Carlos Serio Silva, Jorge Ramos Luna y M. Fernanda Álvarez Velázquez pertenecen a la Red de Biología y Conservación de Vertebrados del Instituto de Ecología A.C.-CONACYT, en Xalapa (Veracruz)



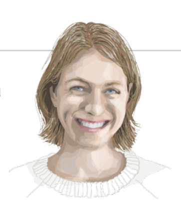
ILUSTRACIONES DE JORGE RAMOS LUNA



EL HABITUAL PELAJE NEGRO de los saraguatos (*Alouatta pigra, 1*) les ayuda a pasar inadvertidos en las copas de los árboles. Estos primates dispersan con las heces las semillas de los frutos que consumen, lo que favorece la regeneración de las selvas tropicales. Los trastornos cromosómicos que provocan una pigmentación anómala son muy poco comunes en los primates. En el sur de México se ha descubierto un saraguato con leucismo, el primer caso documentado para su especie (*2* y *3*).

por Hannah Marcus

Hannah Marcus es profesora del Departamento de Historia de la Ciencia de la Universidad Harvard. Su investigación se centra en la cultura científica europea entre 1400 y 1700. Recientemente ha publicado *Forbidden knowledge: Medicine, science and censorship in early modern Italy* (University of Chicago Press).



Galileo en tiempos de epidemia

La gran peste que azotó Italia en 1632 obligó a Galileo a reorganizar su trabajo y relaciones familiares

El nuevo coronavirus ha trastocado nuestra vida en los últimos meses y nos ha obligado a trabajar de modos completamente distintos. Para los científicos, uno de los precedentes más conocidos de productividad durante una epidemia es el de Isaac Newton: pasó el «año milagroso» de 1666 en la campiña inglesa, evitando la peste y desarrollando sus ideas sobre la gravedad, la óptica y el cálculo infinitesimal. Sin embargo, el aislamiento y la contemplación, que están al alcance de pocos, son solo una de las maneras posibles de reaccionar ante una epidemia. El astrónomo, físico y matemático Galileo Galilei, que convirtió el telescopio en un instrumento científico y puso los cimientos de la nueva física del movimiento, nos sugiere un modo más asequible de hacer ciencia en tiempos de crisis. No en vano algunos de los episodios más turbulentos de su vida tuvieron lugar durante la gran peste.

Nacido en 1564, Galileo vivió en Florencia la epidemia de peste de 1575-1577, que arrasó el norte de Italia y acabó con la vida de un tercio de la población de Venecia, cerca de 50.000 personas. Es muy probable que a partir de 1571, como estudiante de medicina en Pisa, aprendiera más cosas sobre la enfermedad. Pese a que, en contra de los deseos de su padre, abandonó la medicina por las matemáticas y la astronomía, no dejó de leer y discutir sobre la peste.

En 1592, Galileo obtuvo una plaza de prestigio en la Universidad de Padua y en 1610 publicó *Sidereus nuncius* («El mensajero sideral»). El pequeño volumen anunciaba los descubrimientos que había realizado con el telescopio: un raudal de estrellas nunca antes vistas; montañas que se alzaban sobre la superficie de la Luna; y, sobre todo, las nuevas «estrellas mediceas», lunas que orbitaban Júpiter nombradas así en honor de su futuro patrón. Ese mismo año, su amigo Ottavio Brenzoni le envió una copia de su tratado sobre la peste, lo que retrospectivamente nos recuerda que los descubrimientos celestes de Galileo no podían quedar completamente al margen de los acontecimientos terrestres.

La correspondencia de Galileo contiene referencias al brote epidémico que castigó la Toscana en 1630. Su hijo, Vincenzo, que había marchado a un pueblo cerca de Prato dejando su hijo pequeño al cuidado de Galileo, se justificó diciendo que: «si decidí venir aquí fue para salvar mi vida, no para cambiar de aires». Niccolò Aggiunti, discípulo de Galileo y profesor de matemáticas en Pisa que al cerrar la universidad volvió a Florencia con su padre, lamentaba con humor negro su sujeción a la disciplina parental: «Quiero vivir bien, pero él quiere que muera sano. Mientras no muera por la peste, no le importa que muera de hambre». Nuestra experiencia de los últimos meses nos permite empatizar con el mejor amigo de Galileo, el matemático Benedetto Castelli, que en 1631 lamentaba que parecía que «hacía mil años» que no veía a Galileo en Roma.

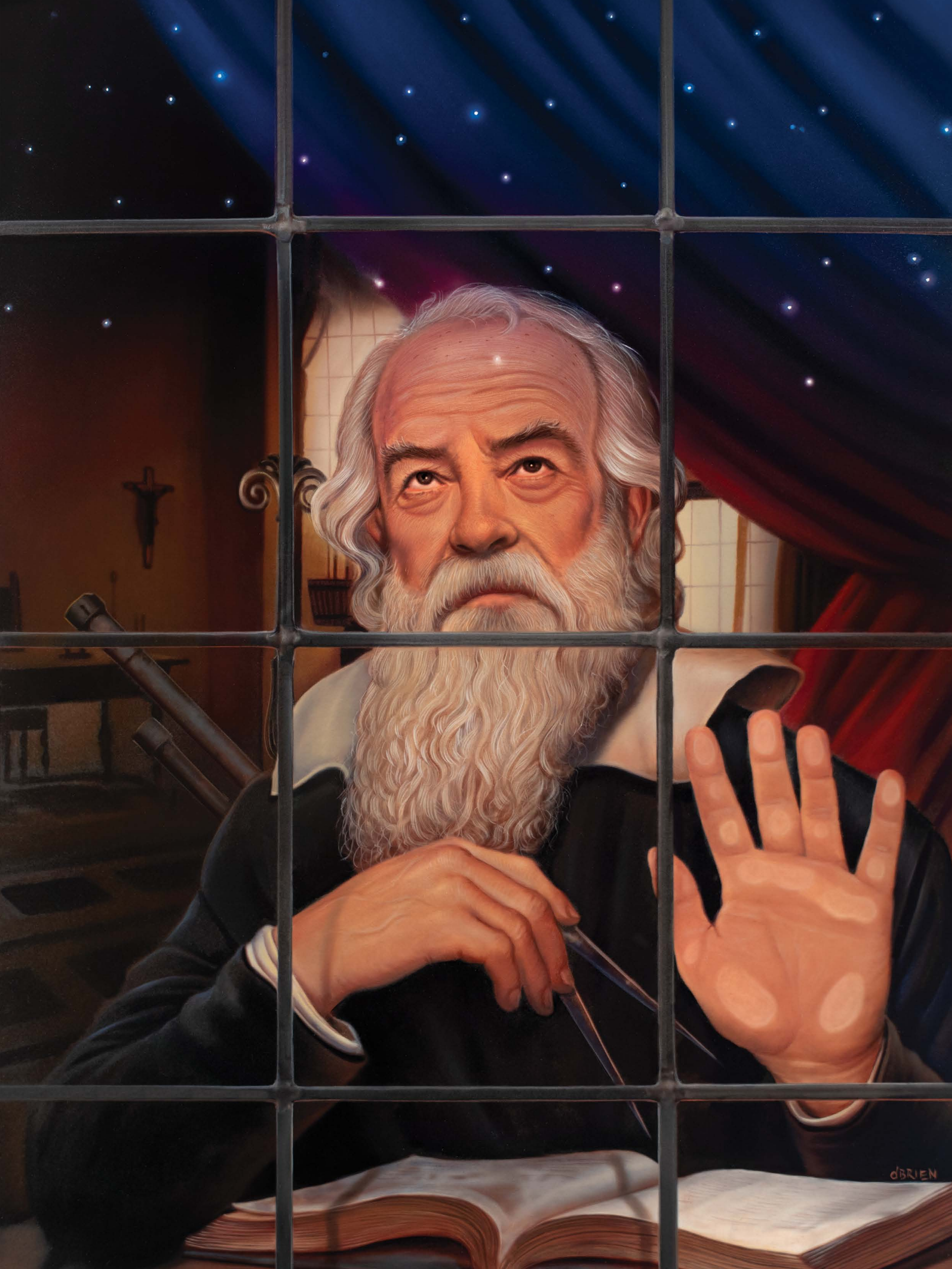
La peste representó tanto un obstáculo como una oportunidad para la obra más famosa y controvertida de Galileo. En la primavera de 1630 había viajado a Roma para preparar la publicación del *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*. Tras superar la censura del Vaticano y obtener el permiso de publicación, el libro iba a ser impreso por la Academia de los Linces, sociedad científica a la que Galileo pertenecía. Pero el brote de peste hizo que Galileo decidiera imprimir el libro en Florencia, con la consiguiente complicación del procedimiento de censura. Algunas partes del libro fueron examinadas por las autoridades en Roma, mientras otras, entre ellas la versión definitiva del texto, lo fueron en Florencia, con el consentimiento reluctante de los censores romanos. La fragmentación del proceso de censura entre dos ciudades permitió a Galileo presentar sus argumentos a favor del movimiento de la Tierra con mayor convicción de la que normalmente se hubiera permitido.

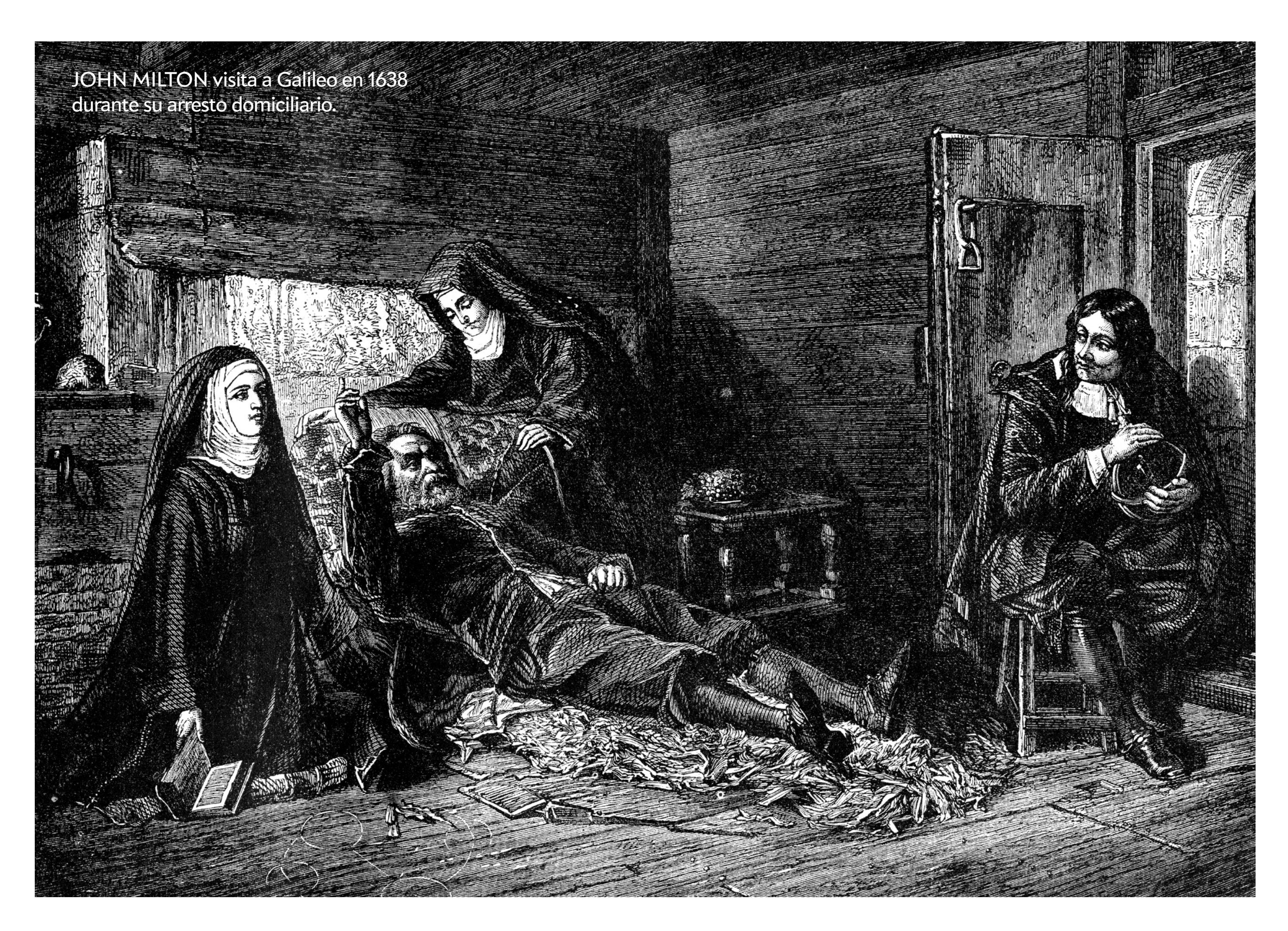
La impresión del libro se completó en Florencia en febrero de 1632. Pese a que la correspondencia entre Florencia y Roma tomaba pocos días, las medidas de salud pública habían obligado a restringir los viajes y el transporte de mercancías. Solo dos ejemplares habían llegado a Roma en junio. La llegada de seis ejemplares más en julio hizo que se prestara más atención a los contenidos y los argumentos de la obra. Cuando el texto alcanzó a la élite de la Iglesia católica en Roma, el papa Urbano VIII y los jesuitas se indignaron por las libertades que se había tomado Galileo en tiempos de peste. En una semana, el libro fue prohibido. En septiembre de 1632 fue citado a declarar por la Inquisición romana. La epidemia decaía, y el juicio estaba a punto de empezar.

Las mismas demoras que habían retrasado la correspondencia y la publicación de su libro parecían jugar ahora a favor de Galileo, quien se declaró inocente y pidió que el juicio se celebrara en Florencia. Una larga carta a su amigo, el cardenal e inquisidor Francesco Barberini, sobrino del Papa, acababa con estas palabras: «Si mi avanzada edad, mi condición física, las aflicciones de mi mente y la duración del viaje en estos tiempos de tribulaciones no son razones suficientes para el Tribunal, haré el viaje». La Inquisición romana respondió con firmeza que debía viajar a Roma si no quería ser arrestado y encadenado.

El 20 de enero de 1633, Galileo partió hacia Roma en un viaje que duró más de tres semanas debido a la cuarentena. El juicio duró seis meses. Galileo fue obligado por la Inquisición a admitir sus errores y a renunciar a su obra. Tras el juicio viajó

TIM O'BRIEN




JOHN MILTON visita a Galileo en 1638 durante su arresto domiciliario.

a Siena, y de allí a su villa en Arcetri, cerca de Florencia, donde pasaría bajo arresto domiciliario los nueve años que le quedaban de vida.

Pese a que la mayoría de los observadores de la censura y el juicio a Galileo se fijaron en sus ideas, a la hija de Galileo, sor María Celeste, monja de clausura de la orden de las Hermanas Pobres de Santa Clara, le preocupaba más su estado físico. En el convento, María Celeste preparó alimentos y remedios para evitar la peste. En noviembre de 1630 le envió una carta y dos electuarios (una medicina mezclada con miel) para cuidar de su salud. «El que no lleva etiqueta está hecho con higos secos, nueces, ruda y sal. [...] Dicen que tomado por la mañana antes del desayuno, en una dosis del tamaño de una nuez, con un poco de vino griego u otro buen vino, protege maravillosamente de la peste.

El segundo preparado, de sabor más amargo, se tomaba del mismo modo. María Celeste le aseguraba, sin embargo, que si iba a continuar tomando cualquiera de ellos mejoraría la receta. La historia de Galileo durante la peste y el juicio de la Inquisición es, también, una historia sobre el cuidado intergeneracional a distancia, la de María Celeste preparando remedios medicinales y espirituales para su querido padre.

Preocupados por la reputación de Galileo, María Celeste y otros miembros de la familia le escribieron regularmente durante el viaje de regreso, proporcionando información sobre los casos de peste en las regiones que atravesaba. Sus misivas están llenas de anécdotas sobre la epidemia, con detalles sobre el número de infectados y sobre aquellos que se habían recuperado o habían muerto. La familia de Galileo le mantuvo al corriente de la evolución de la peste durante el trayecto a su prisión. Cuando nos enfrentamos a la separación de nuestros seres queridos, conviene recordar el apoyo que su familia prestó a Galileo desde la distancia, en un período tumultuoso.

La experiencia de Galileo durante los años de la epidemia de peste revela la realidad del compromiso con la ciencia en un mundo lleno de retos. El reto de articular nuevos descubrimientos que entran en conflicto con la doctrina política y religiosa. El de mantener un programa científico internacional durante casi una década de aislamiento y encarcelamiento. Y, por supuesto, el reto de vivir en un mundo devastado por una epidemia.

En un momento en que nos esforzamos por continuar con nuestro trabajo científico frente a la pandemia del nuevo coronavirus, creo que Galileo podría ser nuestro modelo. Con el apoyo de su familia y reforzado por electuarios de fruta seca y miel, Galileo nos enseña que dedicarse a la ciencia nunca ha sido fácil durante una epidemia, pero que, en cualquier caso, es esencial perseverar.

PARA SABER MÁS

The Galileo affair: A documentary history. Maurice A. Finocchiaro. University of California Press, 1989.

La hija de Galileo. Dava Sobel. Debate, 1999.

Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano. Galileo Galilei. Traducción de Antonio Beltrán Marí. Alianza Editorial, 2011.

Galileo. John L. Heilbron. Oxford University Press, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ciencia, filosofía y teología en el proceso a Galileo. Rafael A. Martínez en *Galileo y su legado*, colección TEMAS, n.º 58, 2009.

por Gerardo Ceballos



Gerardo Ceballos es especialista en ecología animal del Instituto de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Es miembro de la Academia de Ciencias de EE.UU. y autor de más de 500 artículos y de 52 libros.

Frenemos la sexta extinción

Solo así evitaremos las consecuencias más drásticas de la pérdida de biodiversidad

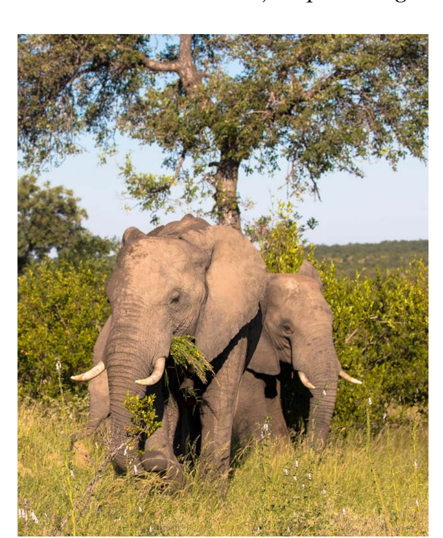
La conservación de la naturaleza y de la biodiversidad constituye uno de los retos más difíciles a los que la humanidad tiene que hacer frente. La deforestación, la sobreexplotación de los recursos naturales y la extinción de especies, así como el cambio climático, son algunas de las principales causas de la situación crítica en la que nos hallamos. Dichos procesos se están intensificando en todo el planeta y, si continúan al ritmo actual, desaparecerán vastos ecosistemas y los servicios que estos nos brindan, como el agua dulce, la polinización de los cultivos y el control de plagas y enfermedades. Para mantener la calidad de vida y el bienestar humanos es, por tanto, fundamental evaluar los problemas ambientales globales y diseñar medidas que los mitiguen.

La pérdida de la diversidad biológica es, sin duda alguna, el problema ambiental más urgente. No solo son preocupantes las tasas de destrucción de ecosistemas y de extinción de especies. También están desapareciendo poblaciones enteras de estas, es decir, el conjunto de individuos de una especie que viven en un mismo lugar. La disminución de las poblaciones, aunque las especies no se extingan, puede tener grandes repercusiones en otras especies con las que se relacionan y en el funcionamiento de los ecosistemas.

Sin embargo, nuestra capacidad de evaluar esas pérdidas es limitada. Ello se debe a que todavía desconocemos la mayoría (el 90 por ciento o más) de las especies que habitan nuestro planeta, lo que significa que podrían desaparecer antes de ser descritas. Este conocimiento incompleto permite a algunos minimizar la gravedad del problema.

A pesar de esas deficiencias, las cifras disponibles sobre la destrucción de especies conocidas son alarmantes. Se estima, por ejemplo, que desde 1980 han desaparecido el 70 por ciento de los individuos de todas las aves y mamíferos. Además, cerca del 40 por ciento de todas las especies de vertebrados (mamíferos, aves, reptiles, anfibios y peces) se hallan en peligro de extinción, y otras miles más se hallan amenazadas. La lista parece interminable: el lobo mexicano, el oso polar, los rinocerontes, los elefantes africanos y asiáticos, el tití león dorado, el tití bicolor, el lobo de crin, la nutria gigante, el quetzal, la grulla americana y la guacamaya azul son solo algunas de ellas.

La evolución es el proceso natural de generación de vida en la Tierra, que tiene como base una relación determinada entre la aparición de nuevas especies y la extinción de otras. En condiciones normales, las tasas de especiación son superiores a las de extinción, lo que da lugar a un aumento en el número de especies con el paso del tiempo. Pero, en ocasiones, esa tendencia se interrumpe: en los últimos 600 millones de años se han presentado cinco eventos conocidos como extinciones masivas, caracterizados por la desaparición del 70 por ciento o más de los seres vivos en períodos de tiempo geológicos reducidos (miles o decenas de miles de años). Estas grandes extinciones han sido causadas por catástrofes naturales, como el impacto de un meteorito o el cambio en la concentración del oxígeno en los océanos.



GETTY IMAGES/EISENLOHR/ISTOCK

Algunos, entre ellos John C. Briggs, de la Universidad Estatal de Oregón, argumentan que la evolución de nuevas especies puede compensar las tasas de extinción actuales. No obstante, los datos indican que dichas tasas son muy elevadas, parecidas a las que se produjeron durante las grandes extinciones del pasado. Por ejemplo, en un artículo que publicamos en *PNAS* el pasado junio, demostramos cómo se ve afectado el grupo de los vertebrados. En el último siglo han desaparecido 741 de sus especies, lo que se corresponde con una tasa de extinción cien veces superior a la normal. Esto significa que, si no hubieran sufrido el impacto de las actividades humanas, todas esas especies habrían desaparecido en un lapso de 10.000 años, no de 100 años. Estudios similares sobre otros grupos de animales y sobre plantas indican tasas hasta mil veces más altas que las normales. Estamos perdiendo especies a un ritmo mucho más elevado que en los últimos dos millones de años y es posible que en las siguientes dos décadas desaparezcan una gran parte de los vertebrados. Dada la magnitud del problema, existe un gran consenso científico de que estamos inmersos en la sexta extinción masiva.

Lo que hagamos en los siguientes años determinará el futuro de la mayoría de las plantas y los animales silvestres y también de la humanidad. Todavía hay tiempo de evitar las consecuencias más trágicas. Necesitamos reducir la pérdida de hábitat, la sobreexplotación de los recursos, el cambio climático, la contaminación, el comercio ilegal de especies y otras causas de la actual extinción. Para contribuir a ese fin, un grupo de investigadores hemos creado People v. Extinction, una plataforma que fomenta el desarrollo de proyectos de recuperación y conservación tanto locales como globales. Somos la única especie que tiene la capacidad de rescatar las especies que se hallan en peligro de extinción. Salvarlas es la única manera de salvarnos a nosotros mismos.

EL PROTAGONISTA SILENCIOSO DE LA REVOLUCIÓN DIGITAL



LOS PROCESADORES MODERNOS (*en la imagen, la placa base de un ordenador*) son capaces de albergar unos 10.000 millones de transistores por centímetro cuadrado.



El transistor de efecto campo constituye la base de toda la electrónica moderna. Concebido hace casi un siglo, su existencia y su compleja historia siguen siendo grandes desconocidas para el gran público

Ignacio Mártil de la Plaza

EN SÍNTESIS

Casi todos los equipos electrónicos actuales funcionan gracias a un pequeño dispositivo: el transistor de efecto campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET). Su singular potencial de miniaturización ha sido el principal responsable de la revolución digital.

El MOSFET fue patentado en 1930 por el ingeniero austrohúngaro Julius Lilienfeld para solucionar el problema de las comunicaciones por cable a larga distancia. Sin embargo, los problemas técnicos retrasaron tres décadas su fabricación.

Las necesidades militares de la Guerra Fría y el nacimiento de la industria informática, entre otros factores, propiciaron que el dispositivo viera la luz en 1960. Desde entonces se ha convertido en el objeto más fabricado de toda la historia humana.

Ignacio Mártil de la Plaza es catedrático de electrónica en la Universidad Complutense de Madrid y miembro de la Real Sociedad Española de Física.



E CONOMÍA DIGITAL, BANCA DIGITAL, TRANSFORMACIÓN DIGITAL DE LAS EMPRESAS o televisión digital terrestre. Seguro que ha leído u oído estas expresiones u otras similares cientos de veces. Y seguro que el término *digital* le suena a sinónimo de novedoso, puntero, competitivo, etcétera. No le falta razón: es así en buena medida. Lo que tal vez no sepa es que todo ese mundo digital es posible gracias a la existencia de un diminuto componente electrónico cuya historia comenzó a escribirse en Centroeuropa hace casi un siglo. Dicho dispositivo se conoce como MOSFET, acrónimo en inglés de su definición, «transistor de efecto campo con estructura de puerta metal-óxido-semiconductor», y miles de millones de ellos trabajan para usted cada día.

Gracias al MOSFET puede hablar al instante con quien desee, tanto si esa persona se encuentra en la calle de al lado como si se halla en la avenida principal de Melbourne. También gracias a él le acompañan permanentemente las fotos de sus seres queridos, puede leer el correo electrónico y hacer uso de las redes sociales, entre otras muchas ventajas. Estos dispositivos se encuentran en su teléfono móvil, en el GPS del coche, en el ordenador, en el televisor donde ve sus series favoritas y puede que hasta en su reloj. El MOSFET se halla en el corazón de absolutamente todos los equipos y plataformas que han originado la revolución de costumbres, de hábitos laborales y de ocio que definen nuestra sociedad. Sin el MOSFET, Internet no existiría.

¿Por qué ha sido este dispositivo el que ha posibilitado la revolución digital? Una de las razones primordiales se debe a su proceso de fabricación y su potencial de miniaturización. El MOSFET ha sido el principal responsable de la vigencia hasta hoy de la célebre ley de Moore, la cual dicta que el número de transistores de un circuito integrado se duplica aproximadamente cada 18 meses. En la actualidad, el tamaño de un MOSFET es similar al de un virus (el SARS-CoV-2, por ejemplo, tiene un diámetro de unos 120 nanómetros, la misma distancia que media entre el drenador y la fuente de un MOSFET moderno). Y, si podemos disfrutar de manera cómoda y sencilla de todos los aparatos y aplicaciones digitales modernos es porque, en la actualidad, un circuito integrado incorpora miles de millones de estos transistores en una superficie de menos de un centímetro cuadrado, los cuales pueden funcionar con un consumo energético ínfimo.

El MOSFET constituye una de las demostraciones más asombrosas de lo que puede lograr la tecnología electrónica actual. Sin embrago, su nacimiento atravesó varias vicisitudes que, durante décadas, hicieron pensar que su «parto» nunca llegaría a término. La historia de este dispositivo no es solo una gran desconocida. También ilustra a la perfección el modo en que las necesidades técnicas de una época se entrelazan con las posibilidades científicas, las circunstancias geopolíticas e incluso con la casualidad para acabar transformando por completo nuestras sociedades.

UN ORIGEN PREMATURO

En cierto sentido, podemos decir que la revolución digital no se gestó en EE.UU. ni en ninguno de los países que hoy se encuentran a la cabeza de la innovación tecnológica. Si atendemos al lugar de nacimiento del progenitor de la idea, el origen de la revolución digital hay que situarlo en un lugar para muchos insospechado: el Imperio austrohúngaro. En efecto, las ideas que acabarían dando lugar al MOSFET se deben a Julius Edgar Lilienfeld (1882-1963), originario de la ciudad de Leópolis, actualmente en Ucrania pero que hasta 1918 formó parte del ya extinto imperio centroeuropeo.

Para entender el objetivo que perseguía Lilienfeld hemos de situarnos en las necesidades técnicas de la tercera década del siglo xx. Era el auge del teléfono y el telégrafo, y AT&T, el gigante de las comunicaciones de EE.UU., quería tender cables telefónicos de costa a costa del país. Eso implicaba construir líneas de entre 6000 y 8000 kilómetros de longitud, las cuales necesitaban repetidores para que la señal no se perdiera durante el viaje. En aquella época, los repetidores se hacían con válvulas de vacío: voluminosos aparatos de aspecto similar a una bombilla que controlaban el flujo de corriente haciéndola pasar por un gas a baja presión situado entre dos electrodos. Sin embargo, estos dispositivos sufrían un gran número de fallos, disipaban grandes cantidades de calor y ocupaban demasiado espacio.

Es así como llegamos a la idea de transistor. Un transistor es, en esencia, un dispositivo capaz de amplificar señales eléctricas, justo lo que necesitaba AT&T para poder establecer comunicaciones a largas distancias. Lilienfeld intentó resolver el problema por su cuenta, ya que, aunque no trabajaba para la compañía, se trataba de una cuestión a la que todos los científicos de la época vinculados a la electrónica trataban de

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/ELENI1/ISTOCK

dar respuesta: cómo amplificar señales eléctricas sin utilizar válvulas de vacío.

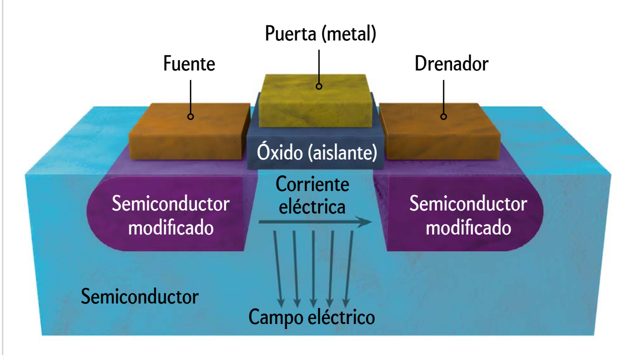
Para ello, Lilienfeld propuso una idea en principio sencilla: controlar mediante un campo eléctrico externo la corriente que circula por un sustrato sólido. A tal fin, consideró construir una estructura formada por un metal, un aislante y un semiconductor; de esta manera, la corriente que atravesase este último debería poder controlarse mediante un campo eléctrico generado desde el metal. A partir de este principio, Lilienfeld propuso entre 1926 y 1933 las nociones esenciales de los dispositivos de efecto campo, las cuales registró en tres patentes sucesivas. En ellas incluso indicó los materiales con los que pretendía fabricar sus dispositivos: sulfuro de cobre (Cu_2S), óxido de cobre (CuO) y óxido de plomo (PbO_2). Y aunque no consta que ninguno de los transistores propuestos por Lilienfeld llegara a fabricarse, la idea clave del funcionamiento del MOSFET (la modulación de la corriente mediante un campo eléctrico) aparece ya perfectamente detallada en sus patentes.

De manera independiente y algo posterior, el alemán Oskar Heil (1908-1994), mientras trabajaba en la Universidad de Cambridge, patentó un dispositivo que proporcionaba la primera implementación de un MOSFET usando conceptos modernos de física de semiconductores, ya que describía el papel que desempeñaban en él los electrones y los «huecos» (zonas del material carentes de electrones y que se comportan como portadores de carga positiva). Su dispositivo debería fabricarse con láminas delgadas de diversos semiconductores, como telurio, yodo, óxido de cobre (CuO) y de vanadio (V_2O_5). No obstante, tampoco está documentado que su idea se llevase a la práctica. Tanto las patentes de Lilienfeld como la de Heil fueron registradas y aceptadas. Pero en aquella época el conocimiento sobre semiconductores era insuficiente, por lo que sus ideas nunca llegaron a materializarse. Por ejemplo, hoy sabemos que los semiconductores propuestos por Lilienfeld adolecen de una movilidad muy baja de portadores de carga, por lo que nunca hubieran logrado que apareciese una corriente eléctrica apreciable.

ASÍ FUNCIONA

El transistor de efecto campo

Originalmente concebido para solucionar el problema de amplificar señales eléctricas de manera fiable, el transistor de efecto campo funciona como un conmutador controlado por un campo eléctrico. En función del voltaje aplicado en la terminal metálica central, denominada puerta (*esquema*), se impide o permite el flujo de corriente entre la fuente y el drenador, las otras dos terminales del dispositivo. Este principio de funcionamiento permite codificar unos y ceros en función del estado (activado o desactivado) de la corriente eléctrica, lo que constituye la esencia de la electrónica digital.



El MOSFET es un «transistor de efecto campo con estructura de puerta metal-óxido-semiconductor», en referencia a la capa aislante (el óxido), que separa la puerta del semiconductor. Su potencial de miniaturización sin pérdida de funcionalidad lo ha convertido en el dispositivo más fabricado por el ser humano. Hoy se encuentra en casi todos los equipos electrónicos. Se estima que, desde 1960, se han fabricado unos 13.000 trillones ($1{,}3 \times 10^{22}$) de transistores MOSFET.

EL IMPACTO DE LA GUERRA

Le Segunda Guerra Mundial supuso, por una parte, una paralización total de las ideas de Lilienfeld y Heil. Pero, por otra, sentó las bases de la tecnología microelectrónica tal y como la conocemos hoy. Esto ocurrió gracias al desarrollo del programa del radar en el bando Aliado, lo que supuso un salto de gigante en la comprensión de la física y la tecnología de los semiconductores.

Los equipos de radar del comienzo de la Segunda Guerra Mundial estaban, una vez más, construidos con válvulas. Además de su baja fiabilidad, el problema de estos dispositivos era que no funcionaban bien a frecuencias altas (por encima de los 500 megahercios), algo esencial para detectar objetos lejanos en movimiento. En cambio, la electrónica basada en semiconductores sí responde a dichas frecuencias. Eso motivó la investigación en semiconductores en tiempo récord y permitió al bando Aliado gozar de una ventaja estratégica decisiva frente a Alemania. A la postre, ese conocimiento redundó en una comprensión profunda de los dispositivos electrónicos, lo cual acabaría permitiendo llevar a la práctica las ideas de Lilienfeld y Heil en los años posteriores.

Tras finalizar el conflicto, los científicos de los Laboratorios Bell, el departamento de investigación de AT&T, retomaron dichas ideas. En 1945, William Shockley y Gerald Pearson concibieron un dispositivo de estado sólido con semiconductores en el que un campo eléctrico podría controlar el flujo de corriente en el semiconductor. En 1948, en un artículo que con el paso del tiempo se convertiría en un clásico, Shockley y Pearson hicieron una demostración teórica inequívoca del efecto campo. Shockley trató de construir el dispositivo, para lo que solicitó el concurso de Walter Brattain, un hábil científico experimental del centro. Sin embargo, aquel primer intento no funcionó. Eso hizo que la idea cayera en el olvido durante algunos años, ya que, en las Navidades de 1947, John Bardeen y Brattain habían inventado el transistor bipolar de puntas de contacto, el primer amplificador operacional de estado sólido de la historia y que, a partir de principios muy distintos, permitió llevar a la práctica los objetivos que se pretendían lograr con el MOSFET.

En años posteriores, Shockley observó cómo crecía Silicon Valley, meca tecnológica de EE.UU. y sede de numerosas compañías dedicadas a lo que años después se conocería como tecnologías de la información y las comunicaciones. Pero Shockley no pudo entrar en la tierra prometida que había imaginado, ya que, aunque en 1956 fundó Shockley Semiconductors, su empresa nunca pudo hacer transistores de efecto campo, mientras que otras compañías los diseñaron, fabricaron y vendieron. Shockley Semiconductors tuvo una vida muy corta y cerró poco después de un año de su fundación. Por esta y otras razones, su

amigo y colega Frederick Seitz, presidente entre 1962 y 1969 de la Academia Nacional de Ciencias de EE.UU., llamó a Shockley «el Moisés de Silicon Valley».

EL RETO DE LA FABRICACIÓN

¿Por qué las ideas de Lilienfeld, Heil, Shockley y otros no pudieron materializarse antes? La razón hay que buscarla en la tecnología de fabricación del dispositivo. Para construir un MOSFET se necesita disponer un aislante de altísima calidad sobre la superficie del semiconductor. De lo contrario, aparecen defectos en la intercara entre el semiconductor y el aislante, los cuales atrapan carga eléctrica e impiden el correcto funcionamiento del transistor. La presencia de estos «estados de intercara», o «estados superficiales», era un problema al que ya se habían enfrentado Bardeen y Brattain mientras trataban de fabricar el transistor bipolar. Pero, en el caso del MOSFET, las dificultades eran tales que, a finales de los años cincuenta, se llegó a pensar que jamás sería posible construir estos dispositivos.

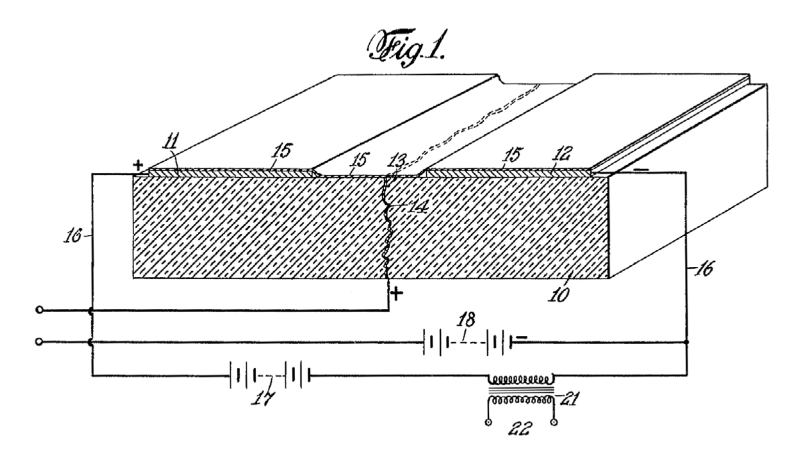
A pesar de todo, los esfuerzos prosiguieron y el primer MOSFET funcional acabaría llegando en 1960. Una vez más, el hito fue de nuevo obra de los Laboratorios Bell, y su logro se debió, entre otros factores, a una pequeña casualidad afortunada. El paso crítico en la invención fue el descubrimiento de que la superficie del silicio (Si) puede oxidarse para formar una capa muy fina de óxido de silicio (SiO_2), un aislante muy estable y que presenta excelentes cualidades en la intercara que lo separa del silicio subyacente.

Fue en 1958 cuando el grupo de los Laboratorios Bell dirigido por Martin M. Atalla halló que, solo si se oxidaba adecuadamente la superficie del silicio, las propiedades de la intercara entre este material y la capa de óxido mejoraban de forma significativa. Para llevar a cabo de manera controlada la oxidación del silicio, y tras múltiples intentos fallidos, Atalla y sus colaboradores llegaron a la conclusión de que era imprescindible efectuar el proceso en tres pasos que, vistos con ojos ajenos, parecen algo más cercano a la magia negra que a la alta tecnología.

Dicho proceso comenzaba por limpiar el silicio con sumo cuidado usando agua completamente desionizada. La razón para ello era que, en experimentos anteriores, los investigadores habían constatado que la presencia de iones de sodio, incluso en proporciones ínfimas, arruinaba todo el proceso. El segundo paso consistía en oxidar el silicio en un flujo de oxígeno a una temperatura de unos 1000 grados centígrados. Por último, era imprescindible incorporar a la atmósfera oxidante una pequeña cantidad de vapor de agua. Esto último fue la casualidad afortunada mencionada más arriba, la cual fue descubierta de manera accidental en el transcurso de los tediosos intentos previos.

Con la correcta oxidación del silicio, Atalla y Dawon Kahng, otro científico del grupo, obtuvieron el primer MOSFET funcional, el cual patentaron de inmediato. Los trabajos del grupo de Atalla para estabilizar la superficie de silicio pueden considerarse uno de los avances más importantes de toda la historia de la microelectrónica. Gracias a ellos se abrió un camino que, con los años, acabaría conduciendo a la invención del circuito integrado y a su producción en enormes cantidades.

No obstante, el dispositivo de Atalla y Kahng era lento y no resolvía las necesidades de los sistemas de comunicaciones telefónicas, prioridad absoluta de AT&T, por lo que no se continuó con su desarrollo. A pesar de la falta de interés mostrada por la dirección de la compañía, Kahng, en un informe de 1961, señaló el enorme potencial que tenía el MOSFET debido a su facilidad de fabricación, lo que posibilitaría incorporarlo en los circuitos integrados que por aquellos años comenzaban a comercializarse. Ese error de apreciación de lo que tenían entre manos marcaría un punto de inflexión en el trabajo visionario y pionero que hasta entonces habían desempeñado los Laboratorios Bell y supondría el inicio del declive de AT&T, compañía hegemónica en el campo de las comunicaciones hasta ese momento.



AUNQUE EL PRIMER TRANSISTOR de efecto campo funcional no llegó hasta 1960, la idea ya había sido patentada en 1930 por el ingeniero austrohúngaro Julius Edgar Lilienfeld (*en la imagen, la figura principal de la primera de sus patentes*). Sin embargo, las limitaciones de la tecnología de la época impidieron su fabricación. Más tarde, las necesidades militares de la Segunda Guerra Mundial y el nacimiento de la electrónica digital impulsaron la investigación en semiconductores que acabaría conduciendo a su producción en masa.

OFICINA DE PATENTES DE EE.UU., PATENTE N.º 1.745.175 (DOMINIO PÚBLICO)

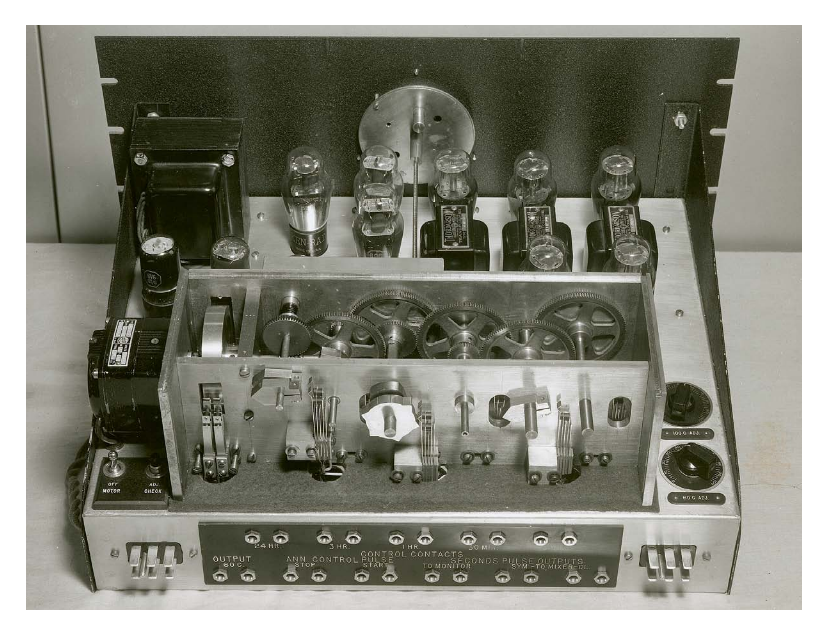
GUERRA FRÍA Y ELECTRÓNICA DIGITAL

Casi al mismo tiempo, varios científicos de las compañías estadounidenses Fairchild Semiconductors y RCA se percataron de las ventajas del MOSFET y lograron fabricar dispositivos funcionales. En 1962, RCA construyó el primer circuito integrado con 16 MOSFET, aunque nunca llegó a comercializarse debido a su elevado coste. Finalmente, los dos primeros MOSFET comerciales se anunciaron a finales de 1964: uno de Fairchild para aplicaciones de conmutación y lógica, y otro de RCA para tareas de amplificación.

La tecnología MOSFET nunca habría alcanzado su éxito actual si no hubiera sido por una singular confluencia de factores: el auge de la Guerra Fría y el surgimiento de la industria informática. Pero ¿por qué un dispositivo inicialmente concebido para amplificar señales acabó convirtiéndose en la pieza clave del tratamiento automatizado de la información? La razón se debe a que la tecnología informática emplea lógica binaria, basada en la manipulación de ceros y unos. Y el MOSFET es un dispositivo electrónico que, de forma natural, funciona de esa forma: cuando hay una conexión entre el drenador y la fuente, el estado resultante opera como un uno, mientras que, cuando no la hay, actúa como un cero. Otra manera de verlo es

que el tratamiento de la información requiere la presencia de dispositivos «activos» (es decir, que amplifiquen señales eléctricas), pero no puede llevarse a cabo con componentes pasivos (un diodo, por ejemplo, solo rectifica señales, pero no las amplifica). Este doble papel fue el origen de las grandes inversiones que durante décadas realizaron las empresas dedicadas a la producción de equipos electrónicos para aplicaciones militares (misiles, radar) y, en años posteriores, en equipos informáticos. En particular, fue la utilización del MOSFET en memorias y microprocesadores lo que finalmente afianzaría el lugar hegemónico del que disfruta hoy en día.

Por otro lado, y desde su incorporación al mercado, la tecnología de fabricación del MOSFET mostró dos claras ventajas sobre la del transistor bipolar: un proceso con un menor número de pasos (lo que se traduce en un coste más bajo y en menos errores de fabricación) y la capacidad para reducir el tamaño del dispositivo sin alterar su funcionamiento. Esto último resultaría crítico, ya que un menor tamaño no solo permite construir circuitos integrados con cada vez más transistores, sino también dispositivos que responden con mayor rapidez y que consumen menos energía. Gracias a ese proceso acelerado de miniaturización, el MOSFET ha sido el principal responsable de la vigencia durante más de medio siglo de la ley de Moore.



ESTACIÓN DE RADIO DE 1943 construida con válvulas de vacío, el antecedente del transistor.

Sin duda, la posibilidad de obtener capas de SiO_2 finas y de gran calidad fue el principal impulso para la comercialización de dispositivos basados en MOSFET. Pero, además, varias mejoras posteriores, tanto en la tecnología como en la estructura de los dispositivos, dispararon el interés por sus aplicaciones. Una de las innovaciones más notables fue la introducción en 1963 de la tecnología CMOS, siglas en inglés de «metal-óxido-semiconductor complementario». Esta estructura, desarrollada por el ingeniero de Fairchild Frank Wanlass, se basa en una combinación de dos MOSFET: uno en el que el flujo de corriente lo llevan los electrones y otro donde lo hacen los huecos. El CMOS es lo que en electrónica digital se denomina un «inversor», y constituye la unidad básica para hacer operaciones lógicas en sistema binario. A esto se une la propiedad clave de que el dispositivo funciona con una disipación de potencia extraordinariamente pequeña, lo que hace posible utilizar miles de millones de ellos sin incurrir en un consumo energético inaceptable.

En 1975, RCA comercializó el primer microprocesador con tecnología CMOS, el cual se empleó en aplicaciones militares y aeroespaciales (hoy lo lleva el telescopio Hubble). A partir de 1980, el fabricante de automóviles Chrysler los usó en un sistema para el control del encendido del motor, lo que supuso el primer ordenador instalado en un coche. Las primeras aplicaciones masivas para circuitos CMOS se implementaron en productos de consumo que funcionaban con baterías, como los relojes digitales y los ordenadores portátiles. Hoy, la práctica totalidad de los circuitos integrados modernos están constituidos por infinidad de estructuras CMOS.

UN OMNIPRESENTE DESCONOCIDO

Tras décadas de esfuerzos y mejoras constantes, los circuitos integrados basados en MOSFET representan en la actualidad el 99 por ciento del mercado. Este pequeño aparato es el principal responsable de que nuestros teléfonos móviles y ordenadores, entre otros dispositivos de uso generalizado en buena parte del planeta, funcionen correctamente. No obstante, para el gran público sigue siendo un perfecto desconocido. No deja de resultar asombrosa la enorme distancia que existe entre algo tan cotidiano como usar el teléfono y el casi absoluto desconocimiento que tiene la sociedad acerca de la tecnología que lo hace funcionar. Para ilustrar la relevancia de la cuestión indicaré solo un dato: se estima que desde 1960 se han fabricado unos 13.000 trillones ($1{,}3 \times 10^{22}$) de transistores MOSFET. Esa cifra lo convierte, simple y llanamente, en el dispositivo fabricado por el ser humano más numeroso de la historia.

Aunque el primer transistor operacional fuera el bipolar, construido en 1947, las ideas que condujeron al transistor de efecto campo habían surgido mucho antes, en los años veinte del siglo pasado. Aquella fue una aparición prematura, que impidió que el dispositivo se materializara debido a las limitaciones de la tecnología de la época. Al final, la sinergia entre las necesidades de los ordenadores digitales y las enormes ventajas del proceso de fabricación del MOSFET propiciarían que este acabase ocupando el lugar hegemónico del que disfruta en la actualidad. Pero no siempre ha sido así. En el campo de la microelectrónica, el éxito nunca —o casi nunca— está asegurado. IyC

PARA SABER MÁS

Crystal fire: The birth of the information age. Michael Riordan y Lillian Hoddeson. WW Norton, 1997.

The Moses of Silicon Valley. Michael Riordan y Lillian Hoddeson en *Physics Today*, vol. 50, pág. 42, diciembre de 1997.

Microelectrónica: La historia de la mayor revolución silenciosa del siglo XX. Ignacio Mártil de la Plaza. Ediciones Complutense, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

La longevidad del transistor. Robert W. Keyes en *IyC*, mayo de 2009.

Memorias del futuro. Luca Perniola en *IyC*, enero de 2014.

Más allá de la ley de Moore. John Pavlus en *IyC*, julio de 2015.

RECOLECCIÓN de un campo de soja en Campo Verde, Mato Grosso, Brasil.

BIOLOGÍA

EN BUSCA DE UNA FOTOSÍNTESIS ÓPTIMA



Mejorar la eficiencia del proceso fotosintético es una de las metas propuestas para aumentar el rendimiento agrícola en un planeta cada vez más poblado. Pero el camino está plagado de obstáculos

Renato Bruni

Renato Bruni es el director científico del Jardín Botánico de la Universidad de Parma. Autor de varios libros divulgativos, lleva más de diez años relatando en su blog *Erba Volant* las complejas relaciones entre la humanidad y las plantas.



En los bares típicos de la región italiana de Emilia se sigue contando la leyenda del cochecito implacable que humillaba a los deportivos en la autopista del Sol en tiempos de bonanza económica. Los sorprendía por detrás, los perseguía por el carril de adelantamiento y, cuando cedían perplejos, se alejaba rugiendo en una desdeñosa nube de polvo. El mito habla de un motor Ferrari (o Lamborghini, según los bares) instalado en un Fiat 500, que creaba un bólido con una relación desmesurada entre el peso y la potencia, para ser conducido con la esperanza de que el chasis, los frenos y la transmisión resistieran unos esfuerzos para los que no habían sido diseñados. Hoy en día estas transformaciones se denominan tuneado y unen dos categorías de friquis con puntos en común insospechados: mecánicos e investigadores que combinan la ingeniería y la biología molecular. Una de las empresas más arduas emprendidas por estos últimos es el perfeccionamiento de la fotosíntesis clorofílica, con el fin de poner remedio a un importante problema del futuro: abastecer de alimentos a la población mundial, que en 2050 podría alcanzar los diez mil millones de habitantes, un 30 por ciento más que hoy.

Según los cálculos, el rendimiento agrícola debería aumentar entre un 50 y un 85 por ciento para alimentar a toda la humanidad: una hectárea de arrozal, que en 2010 alimentaba a veintisiete personas, debería poder llenar el plato de cuarenta y tres. Es decir, nuestra maquinaria agrícola debería estar propulsada por un motor con una aceleración superior al 2 por ciento anual. Si dirigimos la mirada hacia atrás, la productividad aumentó un 135 por ciento entre 1960 y 2005 gracias a las innovaciones genéticas, tecnológicas y agronómicas que literalmente puso en el campo la revolución verde. Sería una tendencia compatible con las necesidades futuras, pero esa progresión ya no es alcanzable con las mismas marchas escalonadas usadas hasta ahora y hace tiempo que perdió su brío: en los países productores de arroz, uno de los cereales más productivos y base de la alimentación de casi la mitad de la humanidad, el rendimiento por hectárea aumentó un 36 por ciento entre 1970 y 1980, pero solo un 7 por ciento entre 2000 y 2010. En otras fuentes de almidón como el trigo o la patata se observan trayectorias análogas y, si se desea hacer correr nuestra maquinaria agrícola, hay que hallar estrategias diferentes a las seguidas hasta ahora.

PERFECTAMENTE DEFECTUOSA

En las plantas cultivadas, el equivalente de la velocidad de un automóvil se describe mediante la ecuación de Monteith, cuyo resultado coincide con la biomasa potencialmente obtenible por hectárea. Fue definida en la década de 1970 por un físico británico dedicado al estudio de los efectos del ambiente, la luz y la meteorología en el rendimiento agrícola, y en ella operan tres eficiencias diferentes: la captación de luz útil, la acumulación selectiva y el rendimiento fotosintético o, lo que es lo mismo, la conversión de la luz en biomasa. Estos parámetros tienen referencias precisas. Por ejemplo, la acumulación selectiva implica el descubrir variedades de patata que acumulen el exceso de energía en tubérculos más grandes y con más almidón en lugar de invertir el excedente en tallos y hojas más grandes, que no son comestibles. El producto de las tres eficiencias se multiplica luego por un coeficiente vinculado a la radiación solar disponible en la zona de cultivo. Es una fórmula calibrada para las necesidades humanas, que si bien tiene en cuenta los límites biológicos de cada proceso, ve la planta como una máquina de calorías y no mide su idoneidad para la supervivencia, sino su rendimiento.

En los últimos setenta años y durante la revolución verde hemos maximizado dos de los tres procesos: la captación de la luz y la acumulación focalizada, lo que garantizó una aceleración del 135 por ciento. Esto amplió el acceso a los alimentos, aunque con asimetrías innegables, ya que algunas especies disfrutaron de márgenes más amplios: entre 1960 y 2010, la producción

EN SÍNTESIS

En un futuro cercano habrá que aumentar notablemente la producción agrícola para alimentar a la humanidad, en un logro similar al de la revolución verde.

Una de las estrategias persigue perfeccionar la fotosíntesis clorofílica, el proceso que convierte la luz solar en biomasa vegetal.

La fotosíntesis se presta a la modificación de formas diversas, todas ensayadas en la última década, pero los resultados cosechados en el campo quedan lejos de los obtenidos en los invernaderos y los laboratorios.

La estrategia se encuentra en sus inicios, pese a proclamas esporádicas. La mejora del motor de la fotosíntesis exigirá una extensa labor de ingeniería genética, con todos los debates pertinentes.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/ALFFOTO/ISTOCK

de trigo creció un 170 por ciento, mientras que la de yuca, principal fuente de calorías en el África subsahariana, se detuvo en el 60 por ciento. El problema estriba en que ya hemos explotado esos dos parámetros y los escasos decimales de mejora que podamos añadir no bastarán, si bien en algunas pruebas de campo recientes se han logrado incrementos en la producción del maíz transgénico del 5 al 10 por ciento, gracias al aumento de la superficie foliar. Falta la última eficiencia, la del rendimiento fotosintético, que afortunadamente aún está lejos de sus límites teóricos, estimados en el 9,4 por ciento y el 12,3 por ciento para cada uno de los dos tipos de fotosíntesis posibles, que marcan el porcentaje máximo de energía luminosa transformable en biomasa. Por desgracia, fundamental como es, tal rendimiento no ha variado o lo ha hecho muy poco, pues resulta difícil, caro y de resultados inciertos.

Con el razonamiento de un mecánico diríamos que hasta ahora hemos estado trabajando en la transmisión y la distribución, pero hemos descuidado la potencia del motor, entre otras razones porque carecíamos de herramientas adecuadas. Varias partes de la intrincadísima red de intercambios, reciclajes, distribuidores, válvulas y flujos que en las células vegetales combinan la luz, el dióxido de carbono y el agua hasta obtener el producto final de la fotosíntesis, la glucosa y, de esta, el almidón, son aún poco claras. Hacer una versión vegetal del Fiat 500 modificado con un motor Ferrari implica sortear una serie de obstáculos conocidos, dictados por la propia naturaleza de la fotosíntesis y particularmente difíciles por razones engañosamente triviales: mientras que un automóvil puede rediseñarse desde cero para satisfacer nuevas necesidades, en la planta hemos de apañarnos con lo que la evolución pone a nuestra disposición y, si bien podemos construir carreteras rectas y lisas para ir más rápido, el ambiente de un campo agrícola está lleno de curvas y de obstáculos.

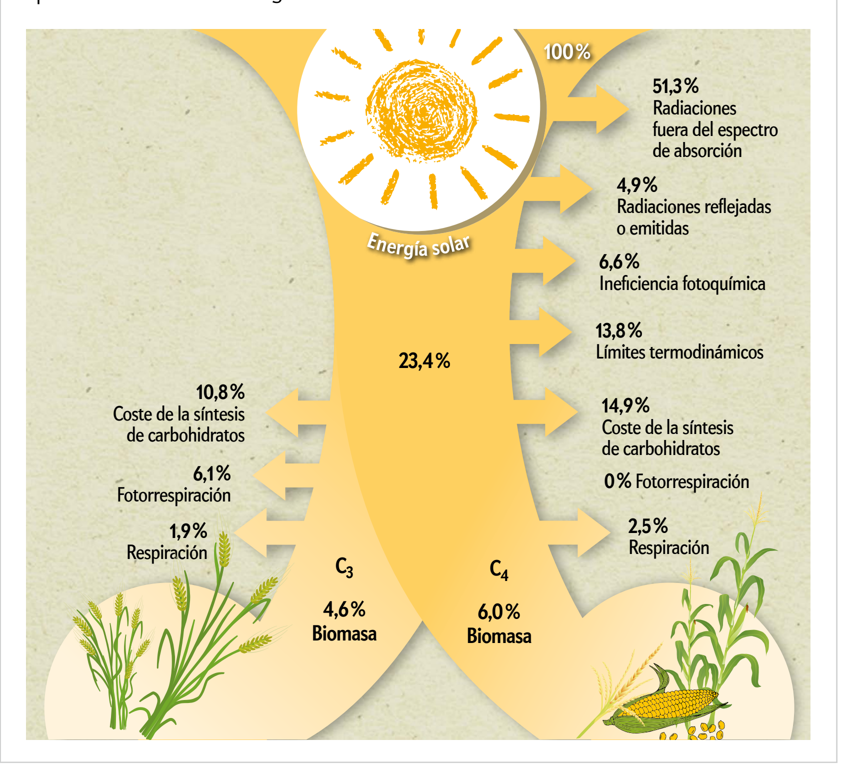
La fotosíntesis ha evolucionado superponiendo rasgos ideales para garantizar la vida, pero no necesariamente para maximizar la productividad, imponiendo una serie de compromisos integrados sin seguir la ecuación de Monteith. Esto deriva en fugas y mermas que cualquier mecánico o ingeniero, desde su perspectiva que prioriza las prestaciones, definiría como graves fallos de diseño. En el mejor de los casos la fotosíntesis transforma en biomasa un mero 6 por ciento de toda la energía solar disponible, con innumerables vías de dispersión: luz no captada, energía perdida, límites termodinámicos, sistemas de fotoprotección y reciclajes esenciales para remediar las limitaciones del complejo enzimático conocido como ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa, o rubisco (*véase el recuadro* «Un proceso ineficaz»). En el conjunto de acontecimientos que rigen la evolución y la vida esto no tiene demasiado valor, pero para un mecánico es como tener 100 caballos de fuerza en el motor y que solo seis lleguen a las ruedas: así no se adelanta a nadie en la autopista.

Una de las numerosas enzimas participantes es crítica por su conocida ineficiencia y por las pérdidas que causa; no es otra que la mencionada rubisco. La primera de sus limitaciones es la lentitud, 1000 veces mayor que los otros sistemas enzimáticos, mientras que la segunda es su escasa selectividad: casi una vez de cada cinco se equivoca y confunde el dióxido de carbono (CO_2) con una molécula de oxígeno (O_2), lo que genera sustancias que además de inútiles resultan tóxicas para la célula (*véase el recuadro* «Dos vías para una enzima»). Aún peor, en situaciones de calor y sequía llega a fallar casi la mitad de las veces. Esto es consecuencia de su aparición en épocas geológicamente muy lejanas, como el Precámbrico, hace mil millones de años, en que el oxígeno escaseaba, mientras que ahora abunda en el aire, con una concentración del 21 por ciento. A fin de compensar semejante ineficiencia, la planta produce la rubisco en cantidades enormes, que suponen del 30 al 50 por ciento de todas las proteínas vegetales, por eso, si fuera posible reemplazarla o perfeccionarla con unos retoques,

LUZ SOBRE LA FOTOSÍNTESIS

Un proceso ineficaz

Vista con los ojos humanos, la fotosíntesis es un proceso ineficaz, ya que la conversión total en biomasa de la energía solar raramente supera el 6 por ciento. Se conocen los pasos críticos, que dependen de los compromisos evolutivos que las plantas tienen que satisfacer: la fotosíntesis no tiene finalidad productiva pero debe contribuir a la supervivencia en un ambiente. Además, los organismos vivos no hacen «planes» según objetivos específicos. La disminución del rendimiento es algo común en todas las plantas, pero la diferencia entre las especies vegetales de los tipos C_3 y C_4 resulta notable. Después de haber manipulado las etapas comunes de ambas, ahora se intenta incorporar las ventajas de las últimas a las primeras para optimizar el rendimiento agrícola.



DANILO SOSSI (*ilustración*). FUENTE: «CLIMATE-SMART CROPS WITH ENHANCED PHOTOSYNTHESIS», POR C. JANSSON, ET AL. EN *JOURNAL OF EXPERIMENTAL BOTANY*, VOL. 69, N.º 16, PÁGS. 3801-3809, 18 DE JULIO DE 2018.

el rendimiento del Fiat 500 fotosintético podría acercarse al de un deportivo.

A pesar de que la rubisco muestra cierto grado de diversidad en distintas especies vegetales, ese rasgo no se puede explotar con las mismas estrategias empleadas por los agrónomos y los genetistas durante la revolución verde. Las versiones más veloces y, por tanto, más eficientes en la asimilación del dióxido de carbono son también las más descuidadas; por el contrario, las más precisas son más lentas. Es un caso proverbial de incompatibilidad entre pronto y bueno.

La diversidad biológica, en cambio, sí entra en juego con la aparición de los sistemas limitadores del daño y con la recuperación de parte de la energía invertida en compensar los errores. Estas soluciones bioquímicas adoptan diversas formas y modalidades en las algas, las cianobacterias y las plantas de distintas familias. Una de ellas consiste en aumentar la concentración de dióxido de carbono en torno a la rubisco para mantener alejado el oxígeno y reducir el margen de error; esta es la solución que, con diferentes formas, han adoptado las cianobacterias, capaces de realizar la fotosíntesis, y algunas plantas terrestres, las llamadas C_4. En la mayoría de las otras, las plantas C_3, interviene un sistema de reparación conocido como fotorrespiración, que además de limitar el daño recupera alrededor del 75 por ciento del CO_2, mientras que consume hasta el 30 por ciento de la energía fotosintética en cultivos como la soja y el trigo. En caso de calor y sequía, este consumo aumenta hasta el 50 por ciento. Sin embargo, las variantes son imposibles de introducir en plantas cultivadas mediante selección tradicional, y veinte años de investigación han dejado perfectamente claro que el último coeficiente de Monteith solo es susceptible de mejora con la biología sintética y el uso intensivo de las técnicas de genomodificación (OMG, *véase el recuadro* «Dos ciclos comparados»). En suma, para que funcione con más celeridad, es preciso rehacer de alguna manera el motor de la fotosíntesis.

LA CABEZA DENTRO DEL CAPÓ

La modificación de la fotosíntesis puede hacerse de diversos modos, todos concebidos en la última década, con éxito desigual. Se puede ayudar a la rubisco a que no cometa tantos errores añadiendo carburadores bioquímicos que enriquezcan con CO_2 el entorno de la enzima; es posible hacer más económica la fotorrespiración o incluso eliminarla implantando sistemas de otros organismos, como los microbianos. Se puede mejorar la recuperación de la fotosíntesis, que cuenta con un eficaz sistema para proteger de la luz excesiva los orgánulos responsables de la fotosíntesis, los cloroplastos. Así y todo, el sistema tarda mucho en reiniciarse cuando el automóvil se detiene.

Por paradójico que parezca, uno de los enfoques seguidos consiste en encoger el sistema fotosintético, tanto en tamaño como en número. Se ha visto que las estructuras más ligeras, al igual que las carrocerías más aerodinámicas, mejoran las prestaciones. La fotosíntesis se basa en un equipo de diversas moléculas, entre ellas el pigmento llamado clorofila y algunos carotenoides, que además de hacerse evidentes en la coloración de las hojas en otoño, intervienen en las primeras etapas de captación de la luz, como antenas capaces de captar una señal luminosa. El uso de equipos moleculares más ligeros, las antenas de fotocaptación truncadas (*truncated light-harvesting antenna*), ha permitido aumentar la biomasa gracias a la mejora en la distribución de la luz. Si no es captada en exceso por las antenas más externas, esta penetra hacia los cloroplastos y las hojas más alejados de la fuente luminosa, evitando así la saturación de los cloroplastos más expuestos. Así, en plantas de soja y de arroz dotadas de sistemas fotosintéticos ligeros, el proceso aumentó un 30 y un 40 por ciento, al menos en el laboratorio.

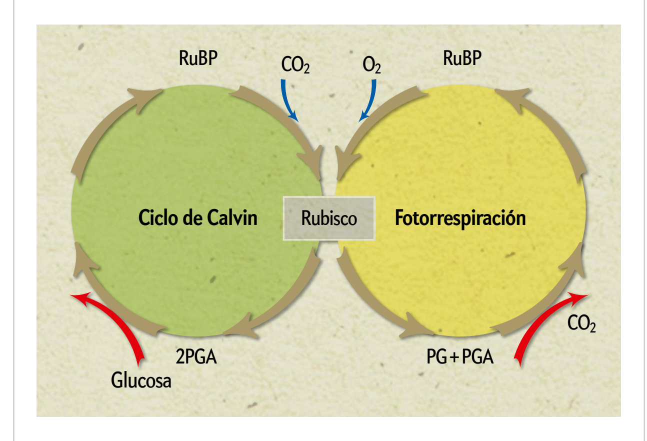
Ahora bien, las prestaciones de un automóvil no se limitan a la velocidad máxima; la aceleración siempre ha sido un factor diferenciador entre un utilitario y un deportivo y el «de cero a cien» también es aplicable a las plantas. A pleno sol una planta absorbe más luz de la que puede asimilar y el exceso desencadena ciertas reacciones químicas que producen radicales libres, dañinos para los cloroplastos. El daño se mitiga mediante un proceso limitante llamado extinción no fotoquímica, o NPQ (del inglés, *non-photochemical quenching*), que disipa la energía sobrante en forma de vibraciones moleculares, es decir, calor. Es una especie de circuito refrigerante inverso, que calienta para evitar que se queme el motor de la fotosíntesis, pero que al mismo tiempo lo pone al ralentí.

Por supuesto que eso acarrea un coste, de modo que la radiación electromagnética es canalizada en una dirección improductiva; pero sobre todo, mientras que el interruptor se acciona muy rápido ante la luz intensa, recobrar la eficiencia máxima tras el paso de una nube o cuando el viento inclina una hoja hacia la sombra requiere varios minutos, durante los cuales esa parte no produce tanto como podría. Esta capacidad de aceleración propia de un tractor limita las posibilidades de operar a toda velocidad, de ahí que se trabaje para reducir sus efectos. Se cree que en las condiciones de las latitudes medias el fenómeno reduce el rendimiento fotosintético hasta en un 30 por ciento y

UN FUNCIONAMIENTO AMBIGUO

Dos vías para una enzima

La fotosíntesis depende de la enzima más abundante en la Tierra, la rubisco, para fijar el carbono atmosférico en el ciclo de Calvin. El funcionamiento de esta enzima es ambiguo y, a partir de la RuBP (ribulosa-1,5-bisfosfato), puede confundir el CO_2 con el O_2, e iniciar un camino desfavorable que se agrava con el calor y que algunas plantas remedian con la fotorrespiración, que tiene un coste energético y recupera solo una parte del CO_2 en forma de 3-fosfoglicerato, o PGA, esencial para la glucosa (PG indica el 2-fosfoglicerato). Las especies C_4 como el maíz, la caña de azúcar o el sorgo, poseen, en cambio, un sistema que evita la fotorrespiración y asegura mayores rendimientos, que se intenta implementar en plantas como el trigo y las leguminosas para aumentar su rendimiento.



DANILO SOSSI, SEGÚN EL AUTOR

que sería posible limitar esta pérdida al 10 por ciento. En la planta del tabaco se han desarrollado sistemas modificados genéticamente para expresar genes que intervienen en la síntesis de carotenoides activos en el proceso NPQ, como la zeaxantina y la violaxantina, con los que se consigue un aumento de la biomasa del 20 por ciento en el laboratorio y del 15 por ciento en condiciones reales de campo, gracias a una aceleración más rápida desde el estado inhibido.

La fotorrespiración también se considera tradicionalmente un proceso que debe minimizarse si se quiere mejorar la producción de las plantas C_3, y su ausencia es una ventaja en las C_4. Vista a través de los ojos de un mecánico atento a las prestaciones, su coste es enorme: solo en el Medio Oeste de Estados Unidos, las limitaciones fotosintéticas provocan cada año la pérdida de más de 300 trillones de calorías en forma de almidón no producido, mientras que reducir la fotorrespiración en tan solo un 5 por ciento garantizaría, en la misma región, aumentos de la producción por hectárea que reportarían ganancias cercanas a los 500 millones de dólares. Sistemas como los de las plantas C_4 son la base de los dos porcentajes mencionados respecto al máximo teórico de eficiencia fotosintética según Monteith. Ciertamente, el 9,4 por ciento supone el límite para los «utilitarios» C_3, como el arroz y el trigo, mientras que el 12,3 por ciento lo es para los C_4, como el maíz y la caña de azúcar. Hasta el momento, los resultados de la modificación de la fotorrespiración han sido alternos, lo que sugiere una reconstrucción completa mediante la instalación de sistemas alternativos y menos consumidores de energía, y plantea la necesidad de soluciones diferentes según la especie destinataria y el lugar de cultivo.



PLANTA MODELO: Tabacal en Kentucky. *Nicotiana tabacum* es una de las plantas más usadas en los experimentos que intentan mejorar la fotosíntesis y, con ello, el rendimiento agrícola.

GETTY IMAGES/DANBRANDENBURG/ISTOCK

Por ejemplo, la expresión en la planta del tabaco de proteínas que estarían ausentes y que absorben el oxígeno antes de que sea capturado por la rubisco ha arrojado resultados alentadores, con un aumento en la producción de campo de hasta el 50 por ciento. La introducción de complejos enzimáticos que eluden el sistema endógeno aportando una eliminación más económica también ha funcionado en la patata y la camelina (*Camelina sativa*), esta una planta oleaginosa, en las que se ha conseguido expresar una proteína compleja de la bacteria *Escherichia coli*. En el primer caso, la cantidad de azúcares se cuadruplicó, y con ella la producción de tubérculos se duplicó, en tanto que en el segundo la producción de semillas aumentó un 70 por ciento. El inconveniente es que esto ocurrió en condiciones que pueden no ser factibles en el campo y varias pruebas sugieren que inhibir o alterar la fotorrespiración no conduce necesariamente a beneficios generales fuera de los invernaderos y los laboratorios.

En las condiciones críticas de sequía, salinidad y calor que predominan en algunos campos y que el cambio climático hará cada vez más frecuentes, la fotorrespiración no solo actúa reciclando los residuos de la rubisco, sino que también desintoxica de los radicales libres generados por el estado de estrés. A juicio de varios investigadores, su eliminación podría garantizar buenos resultados entre las cómodas paredes de los laboratorios o de las fábricas verticales, pero podría ser más difícil en la complejidad del medio agrícola, lo cual obligaría a probar tales plantas durante mucho tiempo en zonas de cultivo específicas antes de plantear siquiera un uso práctico.

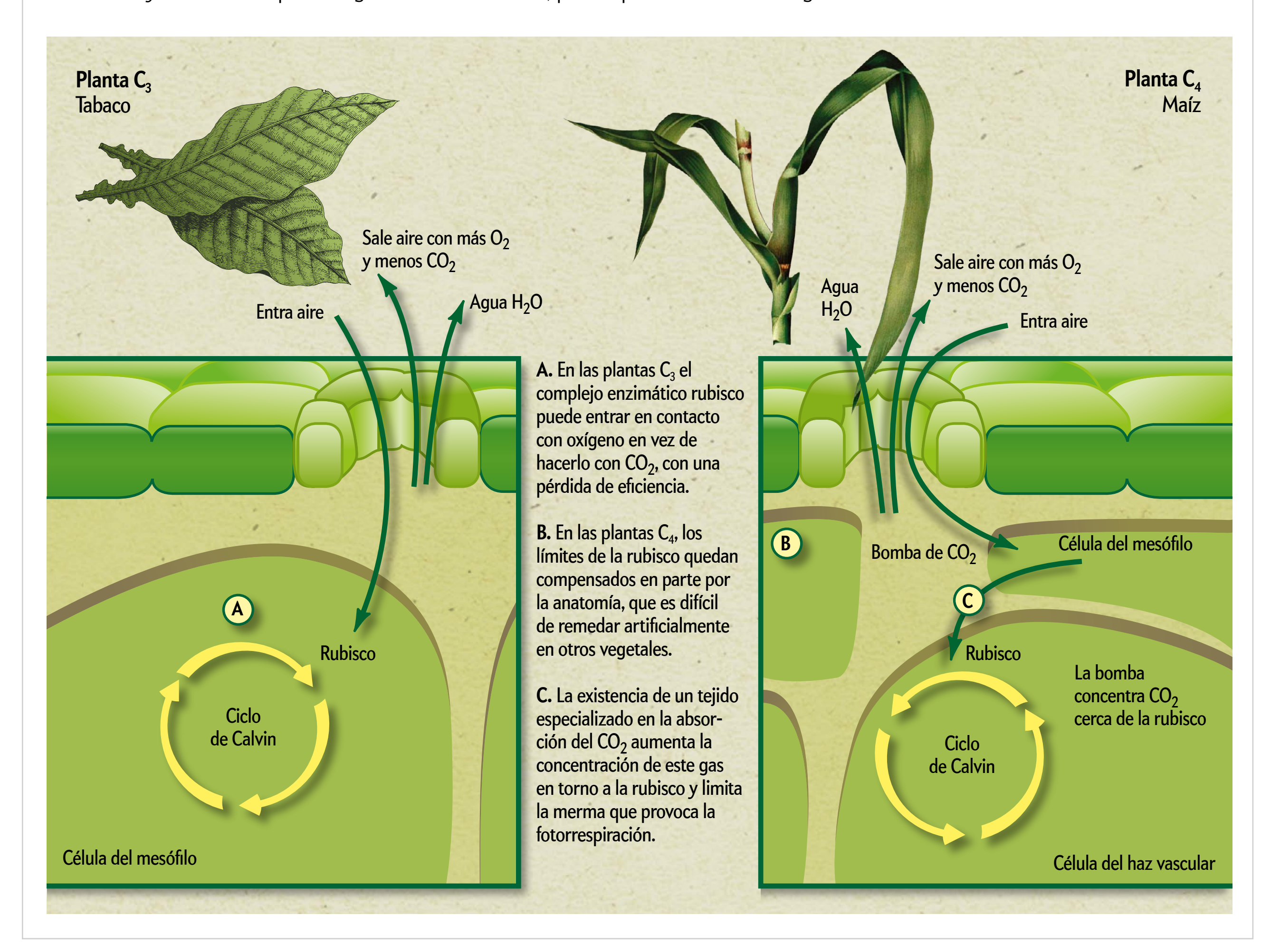
Otras vías prevén recrear artificialmente en plantas C_3 soluciones ya premiadas por la evolución, como los mecanismos de concentración de CO_2. El camino es prometedor en teoría y prevé la inserción de nuevas estructuras, como los β-carboxisomas de cianobacterias en el tabaco o el arroz. Esta no es una operación elemental, porque es necesario meter bajo el capó de la planta un componente no previsto por la biología vegetal, una envoltura proteica que encierre la rubisco junto con sistemas de transporte y otras enzimas, con el fin de mantener alta la concentración de CO_2 en su interior, lo que facilitaría el vínculo entre este gas y los precursores de la glucosa y haría superflua la fotorrespiración. También en este caso, los éxitos cosechados en el laboratorio por la biología sintética se ven contrarrestados por un límite práctico: hasta el momento las plantas de tabaco modificadas solo ofrecen un rendimiento mayor en una atmósfera rica en CO_2, algo irreproducible al aire libre, en el campo. Sin embargo, el advenimiento de la biología sintética permite obtener nuevas soluciones biológicas. Cabe así la posibilidad de diseñar algún día una «neo-rubisco» menos propensa a los errores, una operación que las simulaciones señalan como factible, pero poco implementada por las células. Un obstáculo radica en los genes necesarios para la codificación de esta enzima, que se hallan repartidos entre el ADN nuclear de la célula y el ADN contenido en los cloroplastos, lo que requiere múltiples transformaciones simultáneas.

El procedimiento más drástico, pero sobre el papel más rentable (y por lo tanto más financiado por entidades, Gobiernos y fundaciones), es instalar el motor C_4 en plantas C_3, lo que produciría, por ejemplo, un arroz con la eficiencia del sorgo en cuanto al aprovechamiento de la luz, del agua y del suelo. Los cálculos señalan aumentos superiores al 50 por ciento de la producción por hectárea. Pero crear un utilitario con motor Ferrari exige un esfuerzo enorme, porque ello exige modificar también la carrocería y el compartimiento del motor, y pasar de la teoría a la práctica ha resultado muy complicado hasta ahora.

La fotosíntesis de las plantas C_4 se beneficia de la concentración previa de CO_2, pero esto exige la ubicación precisa de ciertas células especializadas cerca de las células fotosintéticas. Esa peculiaridad recibe el nombre de anatomía de Kranz, donde las células especializadas en la fotosíntesis permanecen en contacto

Dos ciclos comparados

Una hipótesis de trabajo para acercar el rendimiento de las plantas C_3 al de sus homólogas C_4 es transferirles el sistema que obvia los límites de la rubisco y supera los costos de la fotorrespiración. Las diferencias entre ambas clases no acaban ahí, pues también engloban aspectos estructurales, además de bioquímicos, como una anatomía foliar distinta, necesaria para concentrar el CO_2 cerca de la enzima ineficiente y reducir así el riesgo de encuentro con el O_2. Esto dificulta la transformación del motor fotosintético: la agronomía clásica y los OMG de primera generación no bastan, por lo que el uso de la biología sintética es inevitable.



DANILO SOSSI, SEGÚN EL AUTOR

directo con un tejido especializado en la absorción del dióxido de carbono. Las células de dicho tejido presentan paredes gruesas y espacios intercelulares reducidos que frenan el escape del gas carbónico, lo que contribuye a su acumulación en las proximidades de la rubisco y aumenta la eficacia de esta enzima.

Después de veinticinco años de estudio y a pesar de la gran cantidad de descubrimientos hechos en este campo, los requisitos para instalar el sistema C_4 en plantas C_3 aún son oscuros. De momento se ha obtenido una forma rudimentaria en el arroz, mediante la inserción de una parte del arsenal bioquímico de las plantas C_4, en lo que ha supuesto un primer paso fundamental pero incompleto, ya que las plantas modificadas continúan funcionando casi en exclusiva con la fotosíntesis original. Para hacer operativa la transformación, también sería preciso modificar genéticamente la parte anatómica, creando estructuras completas de cero. Pero aún no conocemos todos los genes que intervienen en su producción y se sospecha que podrían ser varias decenas, con límites evidentes al desarrollo artificial del proceso. Para superar este cuello de botella, podría ser útil una variante natural, presente en algunas quenopodiáceas de los géneros *Bienertia* y *Suaeda*, en que la anatomía de Kranz adopta la forma de compartimentos separados en la misma célula. Pero en este caso ignoramos gran parte del manual de instrucciones genético indispensable para trasladar el motor de una planta a otra, así que partimos casi desde el principio.

DENTRO DE QUINCE AÑOS

A pesar de las mejoras de dos dígitos en el rendimiento, no vemos campos cultivados con fotosíntesis acelerada y todos los investigadores serios sitúan el horizonte en no menos de quince años. Y hace diez años, los colegas que trabajaban en el tema hicieron las mismas predicciones. Esto responde a razones precisas que no deben pasarse por alto. La fotosíntesis constituye la piedra angular de un equilibrio fluctuante cuya lógica no es la producción por hectárea, sino la supervivencia en un ambiente. Tecnologías no integradas en el contexto real se arriesgan a

producir proyectos espléndidos que rara vez llegarán a la fase de prototipo en el túnel de viento y que estarán condenados a caer luego por la realidad de los hechos. Hace pocos años que hemos comprobado cuán alejados están los resultados obtenidos en los laboratorios y los invernaderos de las prestaciones en la pista de los campos cultivados.

Por ejemplo, el mero cambio en la densidad hace que las plantas crezcan un 30 por ciento menos en el campo, y el aumento de un grado en la temperatura nocturna se traduce en una pérdida del 10 por ciento de la producción de grano en el arroz. Ello supone una gran merma en la mejora calculada en el laboratorio, que a menudo es calificada como una certeza ante el lector profano. Además, se trabaja con plantas modelo elegidas por su fácil manejo: en el tabaco, por ejemplo, la biomasa se calcula en hojas y tallo, y no en semillas, frutos o tubérculos ricos en almidón. Y también se manipula fácilmente, mientras que los cereales no son tan maleables. Dado que el rendimiento se calcula con respecto a las plantas de control, no es de extrañar que, a la hora de la verdad, muchos intentos alentadores no se traduzcan en éxitos. Sin embargo, estos supuestos avances a menudo se describen con un tono rotundo.

El ambiente también tiene un peso a menudo descuidado. El consumo es otro factor limitante de un coche eficaz: si el motor obliga a repostar cada 50 kilómetros, el tiempo ganado con la velocidad se perderá en cada viaje. Así, por ejemplo, comienzan a aparecer previsiones de que el aumento de la fotosíntesis tendrá un impacto mínimo allí donde el ambiente no sea óptimo en cuanto a fertilidad del suelo, temperatura y, sobre todo, agua. Todos son elementos críticos ante el incipiente calentamiento global. Además, evaluaciones recientes sobre todo del ciclo de vida de estas plantas muestran una mayor acumulación de biomasa al inicio de la temporada de crecimiento, cuando la lluvia es abundante, a lo que sigue un agotamiento más rápido de las reservas hídricas en el suelo que perjudica el crecimiento posterior. El resultado es una disminución en la acumulación de biomasa precisamente en el período más importante para nosotros, cuando crecen los frutos y las raíces, lo que obliga, como en un motor sediento, a más riego, algo que en el futuro podría no ser siempre fácil.

Como en cualquier gran empresa de investigación, también la modificación de la fotosíntesis requiere reflexiones, no solo científicas. Por ahora, las plantas obtenidas con este fin no podrían cultivarse en todas partes porque están sujetas a las restricciones para los OMG (en algunos países, como en Italia, ni siquiera podrían probarse en el campo); sin embargo, según todos los estudios, este es el único modo posible de superar el límite actual de la ecuación de Monteith y aumentar la producción en consonancia con el crecimiento demográfico. Seguramente no podemos correr el riesgo de llegar a 2050 sin haber hecho todo lo posible por optimizar la producción agrícola, y el aumento de la eficiencia fotosintética es un camino que deberemos seguir, a la vez que pensamos también en normativas adecuadas.

Pero al mismo tiempo se deben acallar las narrativas que generen falsas expectativas o que describan esto como la única vía redentora frente a la crisis ambiental y demográfica a la que nos enfrentamos. La reducción de las emisiones y los residuos, la protección ecológica, la distribución equitativa de los alimentos, la adaptación de la alimentación a la sostenibilidad ambiental y la modificación de la fotosíntesis deben continuar en paralelo, no competir entre sí. Sería una lástima no hacerlo, aunque solo miremos la ecuación de Monteith: una vez que el último coeficiente se haya optimizado para 2050, el margen de mejora para sostener a la creciente población mundial con el modelo actual sería cercano a cero.

Nadie duda de que el camino será largo y arduo, pero se empiezan a obtener resultados más sólidos y alentadores, que están llevando al campo los experimentos de la biología sintética, con el rediseño de nuevos pasos de la fotosíntesis. A principios de 2019 se mostró el último prototipo: una planta de tabaco cuyas modificaciones en el ADN de los plastidios han logrado, en el campo y durante varios años, aumentar la biomasa un 25 por ciento, con una eficiencia fotosintética superior al 17 por ciento y un 40 por ciento más de almidón. La operación implicó la modificación simultánea de siete genes, con la inserción de enzimas derivadas de *Escherichia coli*, calabaza y *Arabidopsis* capaces de producir una fotorrespiración menos costosa, a las que se sumó la glicolato-deshidrogenasa del alga *Chlamydomonas reinhardtii*, que evita la producción de peróxido de hidrógeno durante el proceso. En general, el sistema funciona de manera análoga al freno regenerativo, o KERS (del inglés, *kinetic energy recovery system*), que se usa en los autos de carreras: toma la energía perdida en la fotorrespiración y la recanaliza hacia la fotosíntesis. El nuevo recorrido supera el simple aumento en el rendimiento fotosintético: la asimilación de CO_2 aumenta entre un 5 y un 8 por ciento, mientras que el aumento de la biomasa es del 24 al 40 por ciento. Queda por ver si los resultados serán repetibles en vegetales menos maleables pero más útiles de cara a la alimentación, y si ese mismo beneficio se dará en los granos de la soja y de los cereales o en los tubérculos de la patata, entre otros.

Por ahora, hemos de reconocer que muchas hipótesis tentadoras para la modificación de la fotosíntesis se encuentran en pañales y que será necesaria una extensa labor de ingeniería genética para instalar el motor de la fotosíntesis acelerada en el capó de las plantas cultivadas. Por eso también se debe apoyar una aventura científica y tecnológica similar, pero conscientes de que no debe convertirse en una apuesta a la que jugar todas las fichas.

PARA SABER MÁS

Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential. Stephen P. Long, Amy Marshall-Colon y Xin-Guang Zhu en *Cell*, vol. 161, n.º 1, págs. 56-66, marzo de 2015.

Improving crop yield. Marion Eisenhut y Andreas P. M. Weber en *Science*, vol. 363, n.º 6422, págs. 32-33, enero de 2019.

Synthetic biology approaches for improving photosynthesis. Armin Kubis y Arren Bar-Even en *Journal of Experimental Botany*, vol. 70, n.º 5, págs. 1425-1433, febrero de 2019.

Quantifying impacts of enhancing photosynthesis on crop yield. Alex Wu, et al. en *Nature Plants*, vol. 5, págs. 380-388, abril de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Agricultura transgénica. T. Raney y P. Pingali en *IyC*, noviembre de 2007.

Retos del desarrollo agrícola. César Fernández-Quintanilla en *IyC*, abril de 2019.

FÍSICA TEÓRICA

LA PARADOJA MÁS FAMOSA DE LA FÍSICA SE ACERCA A SU FIN

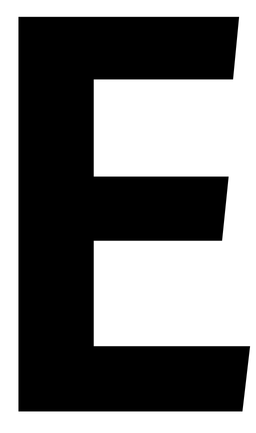
Varios trabajos recientes han demostrado que los agujeros negros pueden liberar información. El resultado parece resolver una paradoja propuesta hace cinco décadas por Stephen Hawking

George Musser



George Musser es redactor colaborador de *Scientific American* y autor de los libros *Spooky action at a distance* y *The complete idiot's guide to string theory*. Ha recibido los premios de periodismo científico del Instituto Americano de Física y de la Sociedad Americana de Astronomía.





En una serie de innovadores trabajos recientes, los físicos teóricos se han quedado emocionantemente cerca de resolver la paradoja de la información de los agujeros negros, un problema que les ha fascinado y atormentado durante casi medio siglo. La información, afirman ahora con seguridad, escapa de los agujeros negros. Si cayésemos en uno, no permaneceríamos atrapados para siempre. Partícula a partícula, la información necesaria para reconstruir nuestro cuerpo acabaría emergiendo.

La mayoría de los físicos han venido suponiendo desde hace tiempo que tal era el caso. Así se deducía de la teoría de cuerdas, la principal candidata a una teoría unificada de la naturaleza. Pero los últimos cálculos al respecto, aunque inspirados en dicha teoría, han resultado ser independientes de ella. La información emerge debido a los mecanismos de la propia gravedad, con apenas un barniz de efectos cuánticos.

Ello supone un curioso cambio de papel de la gravedad. Según la teoría de la relatividad general de Einstein, la gravedad de un agujero negro es tan intensa que nada puede escapar de él. La comprensión más refinada de estos objetos que Stephen Hawking y otros físicos desarrollaron durante los años setenta no puso en cuestión este principio. Lo que buscaban era describir la materia en el interior y en las inmediaciones de un agujero negro usando la mecánica cuántica, pero seguían describiendo la gravedad mediante la teoría clásica de Einstein. Este tipo de análisis híbrido se conoce con el nombre de «semiclásico». Aquel enfoque predecía nuevos efectos en las inmediaciones del agujero negro, pero su interior quedaba excluido del análisis. Los físicos creían que Hawking había agotado el cálculo semiclásico y que, para progresar, sería necesario tratar también la gravedad desde un punto de vista cuántico.

Esa es precisamente la idea que cuestionan los nuevos estudios. Ello se debe a que han encontrado efectos semiclásicos adicionales: nuevas configuraciones gravitatorias permitidas por la teoría de Einstein que no fueron incluidas por Hawking. Aunque irrelevantes en los primeros momentos, tales efectos acaban dominando la física cuando el agujero negro se hace extremadamente viejo, momento en el que deja de ser un reino cerrado para convertirse en un vigoroso sistema abierto. No solo escapa la información, cualquier cosa que caiga en él será regurgitada casi de inmediato. Esta revisión de la teoría semiclásica debe aún explicar de qué manera emerge exactamente la información. Pero, dado el ritmo de los descubrimientos en los últimos dos años, los físicos teóricos disponen ya de pistas acerca del mecanismo responsable.

Según Donald Marolf, físico de la Universidad de California en Santa Bárbara y autor de varios trabajos al respecto, «se trata del desarrollo más importante en el campo de la física de agujeros negros desde Hawking». Para Eva Silverstein, destacada física teórica de Stanford que no ha participado de manera directa en los últimos trabajos, «el cálculo marca un hito».

Cabría esperar que los físicos celebraran un resultado así. Pero, en este caso, se sienten también defraudados. Si el problema hubiera exigido conocer aspectos profundos del comportamiento cuántico de la gravedad, el cálculo habría sido mucho más difícil de llevar a cabo; pero, una vez concluido, habría arrojado luz sobre esas profundidades. Ahora, su preocupación es que hayan resuelto el problema sin conseguir esa panorámica más amplia que buscaban. Con respecto a una teoría completa de la gravedad cuántica, Geoff Penington, de la Universidad de California en Berkeley, afirma: «Esperábamos que responder a esa pregunta, "ver" cómo emerge la información de un agujero negro, requiriese aprender algo sobre la teoría microscópica».

El significado de estos resultados sigue discutiéndose con intensidad en sesiones de Zoom y conferencias en línea. Se trata de un trabajo muy matemático y que, con un toque estrambótico, encadena un truco técnico tras otro, lo que dificulta su inter-

EN SÍNTESIS

Uno de los principales problemas en la búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad es la llamada paradoja de la información de los agujeros negros. ¿Reemiten estos objetos la información contenida en la materia que cayó en ellos?

Tras casi cinco décadas de intentos, varios trabajos publicados a lo largo de los últimos dos años han obtenido las primeras pruebas convincentes de que la información sí puede escapar de un agujero negro.

Sin embargo, el mecanismo concreto que lo permite sigue siendo un misterio. El resultado apunta a que el espaciotiempo no sería una entidad fundamental, sino una que emerge a partir de principios más básicos.

pretación. Aparecen casi todos los conceptos de la física fundamental actual: agujeros de gusano, principio holográfico, espaciotiempo emergente, entrelazamiento cuántico, ordenadores cuánticos... Todo ello hace que la cuestión sea tan cautivadora como confusa.

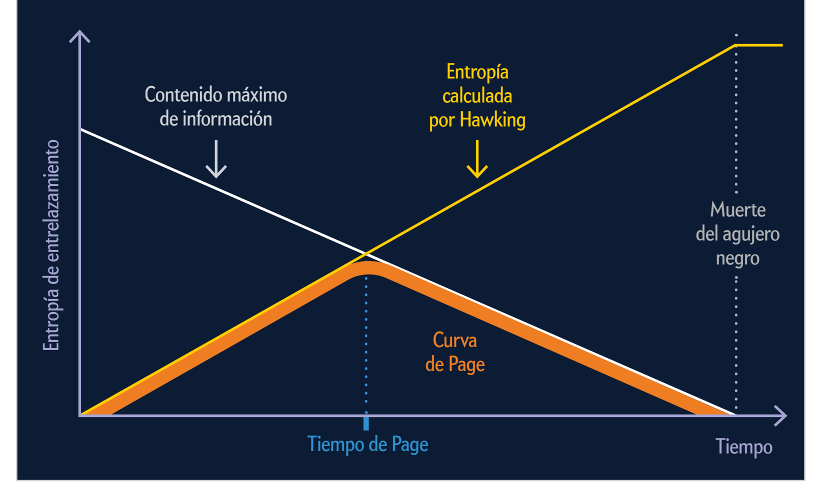
Pero no todos están convencidos. Algunos siguen creyendo que el cálculo original de Hawking es correcto y que, para que la información escape de un agujero negro, es necesario recurrir a la teoría de cuerdas o algún otro tipo de nueva física. «Soy muy escéptico con quien llega diciendo: "He resuelto el problema solo con la mecánica cuántica y la gravedad"», critica Nick Warner, de la Universidad del Sur de California. «Ese enfoque ya nos ha hecho perder el tiempo en el pasado.»

Sin embargo, hay algo en lo que aparentemente todos están de acuerdo. De una manera u otra, el espaciotiempo parece desmoronarse en un agujero negro. Eso significa que el espaciotiempo no puede ser la base de la realidad, sino una estructura que emerge a partir de algo más profundo. Aunque Einstein concibió la gravedad como la geometría del espaciotiempo, su teoría también implica que este puede acabar disolviéndose. Y esa constituye la razón última por la que la información puede escapar de su cárcel gravitatoria.

ENTROPÍA DE ENTRELAZAMIENTO

Curva de Page

La radiación emitida por un agujero negro mantiene una conexión cuántica con este. Esa conexión queda cuantificada por una cantidad conocida como entropía de entrelazamiento. Según el cálculo original de Stephen Hawking, dicha entropía debería crecer de manera continua hasta la muerte del agujero negro. Pero, si la información escapa, la entropía de entrelazamiento debería seguir una curva con forma de V invertida, conocida como «curva de Page».



SAMUEL VELASCO/QUANTA MAGAZINE

LA CURVA DE PAGE

En 1992, el físico Don Page y su familia pasaban las vacaciones de Navidad en su casa de Pasadena, disfrutando de la piscina y viendo el Desfile del Torneo de las Rosas. Page, investigador de la Universidad de Alberta, también dedicó aquellos días a reflexionar sobre las paradojas de los agujeros negros. Sus primeros estudios al respecto, realizados en los años setenta cuando era un estudiante de doctorado, fueron cruciales para que su director de tesis, Stephen Hawking, concluyera que los agujeros negros emitían radiación. Dicho proceso se debe a los efectos cuánticos aleatorios que tienen lugar sobre la superficie del agujero negro. En otras palabras, podemos decir que un agujero negro se consume «de fuera a dentro».

Las partículas emitidas por un agujero negro parecen no transportar ninguna información acerca de lo que hay en su interior. Si un astronauta de 100 kilos cae dentro, el agujero negro verá aumentada su masa en ese mismo valor. Pero, al emitir la radiación equivalente a 100 kilos, esta se hallará completamente desestructurada: nada en ella indicará si proviene del astronauta o de un lingote de plomo con la misma masa.

Eso supone un problema, porque, antes o después, llegará el momento en que el agujero negro emitirá su último microgramo y dejará de existir. Y todo lo que dejará tras de sí será una nube amorfa de partículas moviéndose aleatoriamente aquí y allá, por lo que jamás podremos recuperar lo que hubiera caído con anterioridad en él. Esto convierte la formación y evaporación de un agujero negro en un proceso irreversible, algo que parece contravenir las leyes de la mecánica cuántica.

En su momento, Hawking y la mayoría de los físicos teóricos aceptaron esa conclusión: si la irreversibilidad del proceso contradecía las leyes de la física tal y como se entendían entonces, tanto peor para esas leyes. Pero eso no era del agrado de Page, ya que la irreversibilidad violaría la simetría fundamental del tiempo. En 1980 rompió con su antiguo director de tesis y argumentó que los agujeros negros deben liberar la información, o cuando menos preservarla. Aquello produjo un cisma. «La mayoría de los expertos en relatividad general se alineaban con Hawking, pero los físicos de partículas tendían a estar de acuerdo conmigo», recuerda Page.

Durante sus vacaciones en Pasadena, Page se percató de que ambos grupos estaban pasando por alto algo importante. El rompecabezas no radicaba solamente en qué ocurre al final de la vida de un agujero negro, sino también en qué camino le conduce hasta ese final.

Esa idea le llevó a estudiar un aspecto del proceso de evaporación de los agujeros negros que había sido relativamente ignorado hasta entonces: el entrelazamiento cuántico. La radiación emitida mantiene un vínculo cuántico con su lugar de origen. Si medimos solo la radiación o solo el agujero negro, el resultado parece aleatorio. Pero, si consideramos el conjunto, emerge un patrón. Es algo parecido a encriptar datos con una clave. Sin la clave, los datos son un galimatías ininteligible. Y la clave —si está bien escogida— carece también de sentido por sí sola. Sin embargo, al juntar todo podemos recuperar los datos originales. Page pensó que, en el caso de un agujero negro, tal vez la información escapase encriptada de alguna manera.

Page calculó qué le pasaba a la cantidad total de entrelazamiento entre el agujero negro y la radiación. Esta magnitud se conoce como «entropía de entrelazamiento». Al inicio de todo el proceso, dicha entropía es cero, ya que el agujero negro todavía no ha emitido radiación con la que entrelazarse. Al final —y si la información se preserva—, la entropía de entrelazamiento debería ser igualmente cero, puesto que el agujero negro ya no existe. «Tenía curiosidad por saber qué ocurría entre medias», explica Page.

Al principio, la entropía de entrelazamiento crece a medida que el agujero negro emite la radiación. Page argumentó que esa tendencia tenía que invertirse: la entropía de entrelazamiento tiene que dejar de crecer en algún momento y comenzar a disminuir para acabar siendo cero al final de la evaporación. Por tanto, ha de seguir una curva con forma de V invertida.

Page calculó que la inversión en la tendencia de la curva tenía que ocurrir aproximadamente hacia mitad del proceso de evaporación, en un instante que hoy se conoce como «tiempo de Page». Eso era mucho antes de lo que los físicos habían supuesto. En el tiempo de Page, el agujero negro es todavía gigantesco, muchísimo mayor que el tamaño subatómico en el cual se suponía que deberían aparecer los efectos exóticos. Por tanto, las leyes conocidas de la física serían todavía aplicables, si bien no parecía haber nada en ellas que pudiese producir la inversión de la curva.

Aquello agudizó el problema. Los físicos habían supuesto que los efectos cuánticos de la gravedad solo se tornarían relevantes en situaciones tan extremas que sonaban absurdas, como cuando una estrella colapsa hasta adquirir el tamaño de un protón. Pero lo que Page estaba diciendo era que la gravedad cuántica se tornaba importante bajo condiciones que, en algunos casos, eran similares a las que encontramos en nuestra cocina.

El análisis de Page justificaba denominar «paradoja» —y no un simple misterio— al problema de la información en los agujeros negros, ya que ponía de manifiesto un conflicto en la aproximación semiclásica. «La paradoja del tiempo de Page parecía indicar una ruptura de la física de baja energía en un lugar en que no cabía esperar que eso ocurriese, puesto que las energías eran aún bajas», explica David Wallace, filósofo de la física de la Universidad de Pittsburgh.

El lado bueno de la situación era que la clarificación de Page allanaba el camino hacia la solución. Page había establecido que, si la entropía de entrelazamiento seguía la curva predicha, la información necesariamente escapaba del agujero negro. Eso transformó el debate en un cálculo. Tal y como afirma Andrew Strominger, físico teórico de Harvard: «A los físicos no siempre se nos dan bien las palabras. Se nos dan mucho mejor las ecuaciones».

Así pues, lo que los físicos tenían que hacer era calcular la entropía de entrelazamiento. Si lo conseguían, obtendrían una respuesta clara. ¿Seguía la entropía de entrelazamiento una curva con forma de V invertida? En tal caso, los agujeros negros conservarían la información y los físicos de partículas estarían en lo cierto. De lo contrario, los agujeros negros destruirían o acumularían información y los expertos en relatividad general podrían apuntarse un tanto.

Pero, aunque Page había enunciado con claridad lo que había que hacer, fueron necesarias casi tres décadas para entender cómo hacerlo.

EL AGUJERO NEGRO, DE DENTRO A FUERA

En los últimos dos años, los físicos han demostrado que la entropía de entrelazamiento sigue realmente la curva de Page, lo que indica que la información escapa. Para ello, han procedido por etapas. Primero mostraron cómo funcionaría el proceso con técnicas de teoría de cuerdas. Pero después, en una serie de artículos aparecidos en otoño de 2019, cortaron toda conexión con dicha teoría.

Todo comenzó en octubre de 2018, cuando Ahmed Almheiri, del Instituto de Estudios Avanzados (IAS) de Princeton, concibió un nuevo método para estudiar la evaporación de los agujeros negros. Almheiri, al que pronto se unieron otros físicos, usó una idea desarrollada en 1997 por Juan Maldacena, por entonces en Harvard y actualmente también en el IAS. (Por aquel entonces, Penington había comenzado a trabajar en el problema de manera independiente y publicó un estudio).

Imaginemos un universo contenido dentro de una superficie; algo así como el interior de una esfera de cristal. Aparte de la frontera que lo delimita, la física en el interior de ese universo es básicamente como la del nuestro: con gravedad, materia, etcétera. Por su parte, la superficie de la esfera es también una especie de universo, solo que sin gravedad. Además, al ser una superficie, carece de grosor. Sin embargo, esto se compensa con las ricas propiedades de la física cuántica, las cuales hacen que la frontera acabe siendo igual de compleja que interior. De hecho, cualquier fenómeno que ocurra dentro tendrá un homólogo en la frontera. Desde su formulación por parte de Maldacena, esta equivalencia entre la física de un universo y la de la frontera que lo delimita, conocida en lenguaje técnico como «dualidad AdS/CFT», ha sido el laboratorio preferido de los teóricos de cuerdas, a pesar de que la geometría del interior es diferente de la de nuestro universo.

Siguiendo la lógica de esta dualidad, si tenemos un agujero negro en el interior, este habrá de tener un equivalente en la frontera. Dicho homólogo se hallará gobernado por la mecánica cuántica, sin las complicaciones añadidas de la gravedad, por lo que la información tendrá necesariamente que conservarse. Por tanto, lo mismo deberá ocurrir con el agujero negro.

Cuando los investigadores comenzaron a analizar la evaporación de los agujeros negros usando la dualidad AdS/CFT, tuvieron que superar un pequeño problema: en realidad, en el marco de esta dualidad no hay evaporación. La radiación llena el volumen delimitado por la frontera igual que el vapor en una olla a presión, así que cualquier cosa que el agujero negro emita acabará siendo reabsorbida. «El sistema alcanza un estado estacionario», explica Jorge Varelas da Rocha, físico teórico del Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa.

Para salvar ese obstáculo, Almheiri y sus colaboradores siguieron una sugerencia de Rocha y dotaron a la frontera del equivalente a una válvula que purgase la radiación e impidiese que esta volviera a caer en el agujero negro. Ese truco «absorbía la radiación», explica Netta Engelhardt, del Instituto de Tecnología de Massachusetts y colaboradora de Almheiri. Los investigadores situaron un agujero negro en el centro del espacio, comenzaron a purgar la radiación emitida y vieron qué ocurría.

Para seguir la pista a la entropía de entrelazamiento, usaron una interpretación más granular de la dualidad AdS/CFT que Engelhardt y otros, entre ellos Aron Wall, de la Universidad de Cambridge, habían desarrollado durante la década anterior. Con ella, los físicos pueden determinar qué parte del interior del espacio corresponde a qué parte de la frontera, así como la correspondencia entre las propiedades de uno y otra.

La clave para relacionar ambos lados de la dualidad es lo que los físicos llaman una «superficie extrema cuántica» (tales superficies son genéricas, no es necesario un agujero negro para disponer de una). Imaginemos que soplamos una pompa de jabón en el interior del espacio. La pompa adquirirá la forma que minimiza el área de su superficie. Esta, sin embargo no tiene por qué ser esférica, como las que vemos habitualmente, ya que las reglas de la geometría pueden ser diferentes a las que estamos acostumbrados. Eso permite usar la pompa para estudiar la geometría del espacio. Además, los efectos cuánticos también pueden hincharla.

Al calcular dónde estaban las superficies extremas cuánticas, los investigadores aprendieron dos cosas. La primera, que tales superficies dividen el interior del espacio en dos partes y que cada una de ellas se corresponde con una porción de la frontera. La segunda, que el área de la superficie es proporcional a una parte de la entropía de entrelazamiento entre ambas porciones. Por tanto, la superficie extrema cuántica relaciona un concepto geométrico (el área) con uno cuántico (el entrelazamiento) y permite vislumbrar cómo la gravedad y la teoría cuántica pueden unificarse.

Pero, cuando los investigadores usaron esas superficies extremas cuánticas para estudiar la evaporación de un agujero negro, sucedió algo extraño. Tal y como esperaban, la entropía de entrelazamiento de la frontera aumentaba al principio del proceso. Concluyeron que, dado que lo único que había en el interior era un agujero negro, la entropía de entrelazamiento del interior también se incrementaría. En términos del cálculo original de Hawking no había ningún problema.

Sin embargo, eso cambiaba súbitamente. De pronto, una superficie extrema cuántica se materializaba en el interior del horizonte de sucesos. Inicialmente esa superficie no tenía ningún efecto sobre el resto del sistema, pero acababa siendo el factor determinante para que la entropía comenzara a decrecer. Los investigadores comparan esta transición con lo que ocurre cuando el agua líquida se congela o se evapora. «Este cambio lo entendemos como una transición de fase similar a las termodinámicas entre gas y líquido», explica Engelhardt.

Ello implicaba tres cosas. La primera, que aquel cambio repentino señalaba la aparición de una nueva física que no estaba incorporada en el cálculo de Hawking. La segunda, que la superficie extrema dividía el universo en dos partes. Una era equivalente a la frontera, pero la otra era algo desconocido y acerca de lo cual la frontera no sabía nada. Así pues, purgar la radiación del sistema tenía un efecto sobre su contenido de información. La tercera era que la posición de la superficie extrema cuántica resultaba muy significativa: estaba localizada dentro del horizonte de sucesos y se contraía con este, al tiempo que la entropía de entrelazamiento disminuía. Eso producía el descenso predicho en la curva de Page. Era la primera vez que un cálculo lo lograba.

Al demostrar que la entropía de entrelazamiento seguía la curva de Page, los físicos confirmaron que los agujeros negros liberan información. Lo hacen en la forma altamente encriptada que permite el entrelazamiento cuántico. De hecho, la información se encuentra tan encriptada que ni siquiera parece que el agujero negro la esté emitiendo. Pero hay un momento a partir del cual puede desencriptarse. El trabajo de Almheiri, Engelhardt, Marolf y Henry Maxfield, aparecido en mayo de 2019, demostró todo eso usando una nueva herramienta teórica que cuantificaba el entrelazamiento de forma geométrica.

EVAPORACIÓN DE UN AGUJERO NEGRO

¿Cómo escapa la información?

A medida que un agujero negro radia partículas, la información parece perderse. Eso no ocurre si la entropía de entrelazamiento de la radiación aumenta inicialmente para decrecer después. Varios cálculos recientes han derivado este comportamiento a partir de la formación de una «superficie extrema cuántica» en el interior del horizonte de sucesos. Todo lo que se encuentra en el interior de dicha superficie deja de formar parte del agujero negro. Sin embargo, los detalles de cómo ocurre el proceso y su significado siguen siendo un profundo misterio.

1 Los agujeros negros radian mediante la formación de pares de partículas entrelazadas. Una de ellas escapa, mientras que la otra cae al interior.

2 A medida que el número de pares entrelazados aumenta, también lo hace la entropía de entrelazamiento.

3 Una «superficie extrema cuántica» se forma dentro del horizonte. El agujero negro se convierte en algo parecido a un cascarón.

4 Las partículas que se encuentran en la parte más interior del agujero negro ya no forman parte de él. Su entrelazamiento deja de contribuir a la entropía.

5 A medida que el agujero negro radia los últimos restos de su energía, la entropía de entrelazamiento se aproxima a cero.

Horizonte de sucesos
Radiación entrelazada
Superficie extrema cuántica
Radiación no entrelazada
Entropía de entrelazamiento
Curva de Page
Tiempo de Page
Tiempo

SAMUEL VELASCO/QUANTA MAGAZINE

Pero incluso con esas nuevas técnicas, el cálculo tuvo que reducirse a sus elementos esenciales para tornarse factible. Por ejemplo, el interior de ese universo AdS/CFT solo tenía una dimensión espacial. El agujero negro no era una gran bola negra, sino un pequeño segmento. Aun así, argumentan los investigadores, la gravedad sigue siendo la gravedad, y lo que suceda en este «mundo lineal» debería ocurrir también en el nuestro universo. (En abril de 2020, Koji Hashimoto, Norihiro Iizuka y Yoshinori Matsuo, de la Universidad de Osaka, analizaron agujeros negros en una geometría plana más realista y confirmaron los resultados.)

En agosto de 2019, Almheiri, Raghu Mahajan, Maldacena y Ying Zhao dieron el siguiente paso al dirigir su atención a la radiación. Encontraron que tanto el agujero negro como la radiación que emite siguen la misma curva de Page. La información tiene por tanto que transferirse de uno a la otra. El cálculo, sin embargo, no dice cómo lo hace, sino tan solo que eso ocurre. Estos investigadores descubrieron, además, que el universo sufre una sorprendente reordenación. Al principio, el agujero negro se encuentra en el centro del espacio y la radiación viaja hacia afuera. Pero las ecuaciones revelan que, cuando ha pasado el tiempo suficiente, las partículas en el interior del agujero negro dejan de ser parte de este y pasan a formar parte de la radiación. No es que hayan viajado hacia afuera: tan solo han sido reasignadas.

Lo anterior es importante porque, normalmente, las partículas en el interior tendrían que contribuir a la entropía de entrelazamiento entre el agujero negro y la radiación. Pero, si ya no son parte del agujero negro, tampoco contribuyen a la entropía, lo que explica por qué esta comienza a disminuir. Los autores llamaron «isla» a ese núcleo interior de la radiación y calificaron su existencia de «sorprendente».

¿Qué significa para una partícula estar en el agujero negro pero no ser parte de él? Al confirmar que la información se preserva, los físicos resolvieron un misterio, pero solo para crear otro mayor. Siempre que he preguntado a Almheiri o a otros sobre su significado, la respuesta ha sido una mirada perdida y carente de palabras.

AGUJEROS DE GUSANO

Hasta aquí todos los cálculos dan por buena la dualidad AdS/CFT: la equivalencia entre el interior de la bola de cristal y la frontera de esta. Pero, aunque esta dualidad proporcione un buen laboratorio, en último término no deja de ser artificiosa. Por tanto, el siguiente paso consistió en analizar agujeros negros de forma más general.

Para ello, los investigadores emplearon un concepto desarrollado en los años cuarenta por Richard Feynman y conocido como integral de camino. Esta expresa un principio central de la mecánica cuántica: todo lo que pueda ocurrir acabará ocurriendo. Una partícula que se mueva del punto A al punto B tomará todos los caminos posibles, los cuales se combinarán en una suma a la que cada uno contribuirá con un peso diferente. En general, el camino que tiene el peso mayor es el que seleccionan las leyes de la física clásica, pero no siempre ocurre así. Si el peso relativo de cada camino cambia, la partícula puede saltar de un camino a otro, experimentando una transición cuántica que clásicamente nunca podría tener lugar.

La integral de camino funciona tan bien para describir las partículas que, en los años cincuenta, los físicos la propusieron como una teoría cuántica de la gravedad. Esto implicaba reemplazar una única geometría espaciotemporal por otra que mezclase todas las formas geométricas posibles. Para nosotros, el espaciotiempo parece adoptar una forma bien definida. Por ejemplo, cerca de la Tierra se curva lo necesario para que los objetos orbiten a su alrededor. Pero, en gravedad cuántica, aparecen de manera latente otras geometrías, incluidas algunas extremadamente curvadas, las cuales pueden surgir cuando se dan las circunstancias apropiadas. El propio Feynman retomó la idea en los años sesenta y Hawking fue uno de sus defensores en los ochenta. Pero ni siquiera ellos lograron superar las dificultades que impedían calcular la integral de camino gravitacional, lo que condujo a que los físicos la dejaran de lado en favor de otras formulaciones. «Nunca supimos realmente cómo definirla de forma exacta. Y, de hecho, seguimos sin saber hacerlo», afirma John Preskill, del Instituto de Tecnología de California.

Pero, de forma sencilla, ¿qué significa «todas» las formas posibles? Para Hawking, eso quería decir todas las topologías. El espaciotiempo podría anudarse sobre sí mismo para producir formas similares a una rosquilla, un lazo, etcétera. Esta conectividad adicional crea túneles, o «agujeros de gusano», entre lugares que de otra manera estarían situados en puntos e instantes remotos.

Existen varias clases de agujeros de gusano. Los de tipo espacial son similares a los portales que tanto agradan a los escritores de ciencia ficción y que unen un sistema estelar con otro. Por su parte, los agujeros de gusano espaciotemporales son pequeños universos que surgen del nuestro y que vuelven a reunirse con él un tiempo después. Aunque nadie ha visto jamás uno de estos objetos, la relatividad general los permite, y esta teoría cuenta con un buen historial de predicciones aparentemente absurdas que han sido verificadas, como los agujeros negros o las ondas gravitacionales. Y si bien no todo el mundo coincidía con Hawking en la necesidad de incluir esas formas exóticas en la mezcla, los autores de los últimos cálculos decidieron adoptar la idea de forma provisional.

Siendo realistas, resulta imposible incluir todas las topologías imaginables, ya que estas son literalmente incontables. Por ello, los físicos solo consideraron aquellas más importantes para la evaporación de un agujero negro. Estas se conocen técnicamente con el nombre de «puntos de silla», ya que parecen ser geometrías relativamente suaves. En realidad, los investigadores no hicieron la suma sobre todas las formas, puesto que eso se encontraba más allá de sus posibilidades, sino que usaron la integral de camino como un medio para identificar los puntos de silla.

Tras aplicar la integral de camino al agujero negro y a la radiación, el siguiente paso fue calcular la entropía de entrelazamiento. Esta cantidad se define como el logaritmo de una matriz. Dicho cálculo es siempre difícil. Pero, en este caso, los físicos no disponían ni siquiera de la matriz en cuestión, ya que conocerla requeriría calcular la integral de camino. Tenían que realizar una operación que no sabían cómo hacer sobre una cantidad que no conocían. Para superar ese nuevo obstáculo, sacaron de la chistera otro truco matemático.

Se dieron cuenta de que la entropía no requiere conocer la matriz completa. En su lugar, podían imaginar una serie de mediciones repetidas sobre el agujero negro, las cuales podían luego combinarse de modo que retuvieran lo que necesitaban saber. Ese procedimiento, conocido como «truco de la réplica», se retrotrae al estudio de los imanes en los años setenta y se aplicó por primera vez a la gravedad en 2013.

El físico de Cornell Tom Hartman, que ha tomado parte en estos cálculos, ha comparado el truco de la réplica con com-

probar si una moneda está o no trucada. Normalmente, lo que haríamos sería lanzarla al aire un gran número de veces y ver si sale cara o cruz con una probabilidad del 50 por ciento. Pero supongamos que, por alguna razón, no podemos proceder de esa manera. En tal caso, podríamos lanzar dos monedas idénticas, las «réplicas», y anotar cuántas veces caen del mismo lado. Si esto ocurriese en la mitad de las ocasiones, concluiríamos que la moneda no está trucada. De esta manera, aunque no conociéramos las probabilidades individuales, podríamos hacer juicios básicos sobre la aleatoriedad del proceso. Esto resulta similar a no conocer la matriz completa para el agujero negro, pero, aun así, evaluar su entropía.

Aunque lo anterior sea un truco, contiene física real. La integral de camino gravitacional no distingue las réplicas de los agujeros negros reales, sino que tiene en cuenta todo a la vez. Eso activa algunas de las topologías latentes incluidas en la integral. El resultado es un nuevo punto de silla que contiene múltiples agujeros negros unidos por agujeros de gusano espaciotemporales. Este compite con la geometría regular de un único agujero negro rodeado de una nube de radiación de Hawking.

Al confirmar que la información se preserva, los físicos resolvieron un misterio, pero solo para crear otro mayor

Básicamente, el peso de los agujeros de gusano y el del agujero negro son inversos a su entropía de entrelazamiento. Los agujeros de gusano tienen una entropía elevada, y por tanto su peso es pequeño. Eso hace que al principio sean poco importantes. Pero su entropía va disminuyendo poco a poco, mientras que la de la radiación de Hawking aumenta. Al final, los agujeros de gusano dominan y controlan la dinámica del agujero negro. Al ser un proceso inherentemente cuántico, el cambio de una geometría a la otra es imposible en relatividad general clásica. Esta configuración geométrica adicional y el proceso que permite acceder a ella constituyen los dos descubrimientos principales de la investigación.

En noviembre de 2019, dos grupos de físicos, apodados respectivamente como grupos de la Costa Oeste y la Costa Este por su afiliación geográfica en EE.UU., publicaron sendas demostraciones de la manera en que este truco permite reproducir la curva de Page. Confirmaron así que la radiación se lleva la información contenida en cualquier cosa que caiga en el agujero negro. Además, la teoría de cuerdas no tiene que ser cierta: incluso sus críticos más acerbos podrían aceptar la integral de camino gravitacional. El problema es que, por complejo que sea el análisis, este tampoco revela de qué manera escapa exactamente la información del agujero negro.

LA CONSTRUCCIÓN DEL ESPACIOTIEMPO

Según estos cálculos, la radiación emitida por un agujero negro contiene grandes cantidades de información. Si la midiéramos de la manera adecuada, seríamos capaces de saber qué fue lo que cayó en él. Pero ¿cómo?

Los teóricos del grupo de la Costa Oeste se plantearon qué ocurriría si inyectásemos esa radiación en un ordenador cuántico. A fin de cuentas, una simulación por ordenador constituye en sí misma un sistema físico, y un simulador cuántico no es tan distinto del sistema simulado. Por eso, los físicos consideraron qué ocurriría al juntar toda la radiación, introducirla en un ordenador cuántico gigante y ejecutar una simulación completa del agujero negro.

Aquello dio un giro sorprendente a la historia. Como la radiación se halla fuertemente entrelazada con el agujero negro que la emitió, el ordenador cuántico también se entrelaza fuertemente con él. En el curso de la simulación, el entrelazamiento se traduce en una conexión geométrica entre el agujero negro simulado y el original. En términos sencillos, los dos agujeros negros se conectan mediante un agujero de gusano. Según Douglas Stanford, físico teórico de Stanford y miembro del grupo de la Costa Oeste, «tenemos un agujero negro físico y otro simulado en un ordenador cuántico, y puede haber un agujero de gusano de réplica conectándolos». Esto constituye un ejemplo de una idea propuesta en 2013 por Maldacena y Leonard Susskind, de Stanford, según la cual el entrelazamiento cuántico puede reinterpretarse en términos de un agujero de gusano. A su vez, este proporciona el túnel secreto a través del cual la información puede escapar del interior.

Los físicos han debatido con intensidad hasta qué punto hay que tomar de forma literal estos agujeros de gusano. Al encontrarse tan profundamente escondidos en las ecuaciones, su conexión con la realidad parece tenue, si bien tienen consecuencias tangibles. «Es difícil decidir qué es físico y qué no», afirma el investigador de Stanford Raghu Mahajan, «porque claramente hay algo correcto acerca de estos agujeros de gusano».

Pero, más que pensar en los agujeros de gusano como portales reales existentes en el universo, Mahajan y otros especulan con la posibilidad de que sean la señal de una nueva física no local. Al conectar dos regiones distantes, los agujeros de gusano permiten que lo que ocurre en un sitio afecte directamente a puntos lejanos sin que una partícula, interacción o cualquier otro tipo de influencia tenga que recorrer la distancia que los separa. Se trata de un ejemplo de lo que los físicos denominan «no localidad». Según Almheiri, «los agujeros de gusano parecen indicar que existen efectos no locales». En los cálculos sobre agujeros negros, la isla y la radiación constituyen un mismo sistema visto en dos lugares distintos, lo que implica una quiebra del concepto de «lugar». «Siempre hemos sabido que tiene que haber algún tipo de efecto no local operando en la gravedad; este es uno de ellos», indica Mahajan. «Cosas que creíamos independientes en realidad no lo son», añade.

A primera vista, lo anterior es sorprendente. Einstein construyó la teoría general de la relatividad con el propósito expreso de eliminar la no localidad de la física. La gravedad no se propaga de manera instantánea por el espacio; lo hace de un punto a otro con velocidad finita, como cualquier otra interacción de la naturaleza. Pero, a lo largo de las décadas, los físicos se han percatado de que las simetrías en las que se basa la teoría generan una nueva clase de efectos no locales.

En febrero de 2020, Marolf y Maxfield estudiaron la no localidad que implicaban los nuevos cálculos sobre agujeros negros. Hallaron que las simetrías de la relatividad tenían efectos más importantes de lo que se había supuesto hasta entonces, y que

tal vez fuese aquello lo que daba al espaciotiempo ese aspecto de «sala de espejos» que insinuaban los agujeros negros.

Todo lo anterior refuerza la intuición de numerosos físicos de que el espaciotiempo no constituye el nivel fundamental de la naturaleza, sino que emerge a partir de un mecanismo subyacente que no es ni espacial ni temporal. Para muchos, esta ha sido la gran lección de la dualidad AdS/CFT. Los nuevos cálculos dicen en gran medida lo mismo, pero sin comprometerse con la dualidad ni con la teoría de cuerdas. Los agujeros de gusano surgen porque son el único lenguaje que la integral de camino puede usar para transmitir esa disolución del espacio. Son la forma geométrica de decir que, en último término, el universo no es geométrico.

EL FINAL DEL PRINCIPIO

Los físicos que no han participado en estos cálculos o que ni siquiera trabajan en teoría de cuerdas dicen estar impresionados, aunque mantienen un natural escepticismo. «Hay que quitarse el sombrero, ya que los cálculos no son triviales en absoluto», reconoce Daniele Oriti, de la Universidad Ludwig Maximilian de Munich. Con todo, algunos se sienten incómodos por la gran cantidad de idealizaciones empleadas en el análisis, como la restricción a universos con menos de tres dimensiones espaciales. La última vez que hubo una ola de excitación acerca de integral de camino —allá por los años ochenta, debido al trabajo de Hawking—, la cosa quedó en nada, ya que los físicos teóricos acabaron hartos ante la acumulación de tantas aproximaciones. ¿Están cayendo los físicos actuales en la misma trampa? «Veo a gente hacer los mismos argumentos insustanciales de hace treinta años», critica Renate Loll, física de la Universidad Radboud de Nimega y experta en integrales de camino gravitacionales, quien ha argumentado que los agujeros de gusano han de estar expresamente prohibidos para que la integral de camino no dé resultados absurdos.

Otros escépticos se muestran preocupados ante la posibilidad de que los autores de estos estudios hayan sobreinterpretado el truco de la réplica. Al suponer que las réplicas pueden estar conectadas gravitacionalmente, los autores van más allá de lo que hasta ahora se había exigido de esta técnica. Según Steve Giddings, de la Universidad de California en Santa Bárbara, «están postulando que todas las geometrías que conectan diferentes réplicas están permitidas, pero no queda claro cómo encaja esto en el marco de las reglas cuánticas».

Dadas las incertidumbres de los cálculos, algunos se muestran reticentes a admitir que sea posible encontrar una solución al problema de la información en el contexto de la teoría semiclásica. «No hay ninguna opción buena si nos limitamos a la mecánica cuántica y a la gravedad», afirma Warner, que ha defendido modelos donde los efectos de teoría de cuerdas evitan la propia formación de los agujeros negros. Pero el resultado final es en gran medida similar: el espaciotiempo sufre una transición de fase hacia una estructura muy diferente.

El escepticismo está justificado, aunque solo sea porque los trabajos recientes resultan muy complejos y crudos. Pasará tiempo antes de que los físicos los digieran y, o bien encuentren un error fatal en los argumentos, o bien se convenzan de que funcionan. Después de todo, incluso quienes están detrás de estos desarrollos no esperan resolver la paradoja de la información sin una teoría completa de la gravedad cuántica. No en vano, pensaron que la paradoja sería el punto de apoyo que les permitiría husmear en esa teoría más completa. «Si me hubieran preguntado hace dos años, habría dicho: "Aún queda mucho para obtener la curva de Page. Para ello necesitaremos algún tipo de compresión más profunda de la gravedad cuántica"», reconoce Engelhardt.

Si suponemos que estos nuevos trabajos pasarán el examen, ¿cierran el problema de la paradoja de la información? Los análisis recientes muestran exactamente cómo calcular la curva de Page, la cual revela que la información sí escapa de los agujeros negros. Parecería, pues, que la paradoja de la información ha quedado superada. La teoría de los agujeros negros ya no contiene ninguna contradicción lógica que la convierta en paradójica.

Pero, si de lo que se trata es de dar sentido a los agujeros negros, como mucho nos encontramos ante el final del principio. Los físicos teóricos siguen sin determinar el proceso concreto que permite que la información escape. «Podemos calcular la curva de Page, aunque no sé realmente por qué», señala Raphael Bousso, de la Universidad de California en Berkeley. Ahora, a los astronautas que pregunten si es posible escapar de un agujero negro, los físicos podrán responderles: «¡Por supuesto!». Pero cuando pregunten cómo hacerlo, la inquietante respuesta será: «No lo sé». IyC

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

The entropy of bulk quantum fields and the entanglement wedge of an evaporating black hole. Ahmed Almheiri et al. en *Journal of High Energy Physics*, vol. 12, art. 063, diciembre de 2019.

The Page curve of Hawking radiation from semiclassical geometry. Ahmed Almheiri et al. en *Journal of High Energy Physics*, vol. 03, art. 149, marzo de 2020.

Replica wormholes and the black hole interior. Geoff Penington, et al. en arxiv.org/abs/1911.11977, noviembre de 2019.

Replica wormholes and the entropy of Hawking radiation. Ahmed Almheiri et al. en *Journal of High Energy Physics*, vol. 05, art. 013, mayo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Computación en agujeros negros. Seth Lloyd y Y. Jack Ng en *IyC*, enero de 2005.

Agujeros negros y muros de fuego. Joseph Polchinski en *IyC*, abril de 2015.

Geometría y entrelazamiento cuántico. Juan Maldacena en *IyC*, noviembre de 2015.

Cómo fugarse de un agujero negro. Steve B. Giddings en *IyC*, febrero de 2020.



MEDICINA

LOS VIRUS DE NUESTRO CUERPO

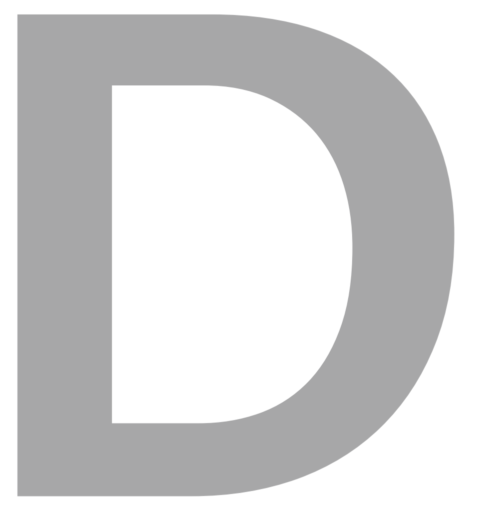
Billones de virus integran el viroma humano. Algunos son dañinos, pero otros podrían resultarnos beneficiosos si aprendemos a servirnos de ellos

David Pride

Ilustración de Harry Campbell



David Pride es especialista en enfermedades infecciosas y profesor adjunto de patología en la Universidad de California en San Diego. El laboratorio que dirige se centra en el papel que las comunidades microbianas desempeñan en la homeostasis, la salud y la enfermedad humanas.



ESDE HACE UN AÑO, MILLONES DE PERSONAS EN TODO EL MUNDO HAN modificado por completo su vida cotidiana y han evitado el contacto con otras para frenar el avance del nuevo coronavirus. Pero, a pesar del distanciamiento social, muchas siguen cayendo enfermas a causa de otras infecciones víricas. Estas se producen porque, según están aprendiendo los científicos a marchas forzadas, multitud de virus acechan sigilosos en nuestro cuerpo, ocultos en las células pulmonares, sanguíneas o nerviosas, así como en el interior de la infinidad de microbios que colonizan el intestino.

Los biólogos calculan que nuestro organismo alberga unos 380 billones de virus, una cantidad diez veces mayor que de bacterias. Algunos causan enfermedades, pero muchos se limitan a coexistir con nosotros sin más. Un ejemplo: en un trabajo de 2019, investigadores de la Universidad de Pensilvania describieron 19 cepas de redondovirus en las vías respiratorias; un puñado de ellos se relacionaron con la periodontitis o con las neumonías, pero otros podrían combatir de hecho las afecciones respiratorias. Los conocimientos incipientes dejan claro que no estamos constituidos básicamente por células «humanas» que de vez en cuando son invadidas por microbios. En realidad, nuestro cuerpo es un superorganismo donde cohabitan células, bacterias, hongos y, además, virus, los más abundantes de todos. Los últimos recuentos indican que hasta la mitad de la materia biológica del cuerpo no sería humana.

Hace una década pocos conocían la existencia del viroma humano. Hoy vemos ese vasto contingente vírico como una parte integral del microbioma humano, un manto de organismos microscópicos pasivos y activos que colonizan prácticamente todos los rincones de nuestro ser. Hemos estado cartografiando el viroma durante diez años, y cuanto más ahondamos en él, más se parece a una asociación que influye en nuestra vida diaria, a veces para bien y otras para mal. Trabajos recientes indican que incluso podemos sacar partido del viroma para fomentar la salud. Investigadores de la Universidad Rockefeller han purificado una enzima vírica que aniquila las bacterias que afectan a los pacientes infectados por estafilococos resistentes a la meticilina. Los resultados son tan alentadores que la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. la ha calificado como un «tratamiento innovador» y ya se encuentra en la fase III de ensayos clínicos. Hoy ya hablamos con naturalidad de bacterias que son «buenas» y «malas» para nosotros. Los virus encajan en esas mismas categorías. El reto reside ahora en averiguar cómo favorecer las primeras y mantener a raya las segundas.

INFECTADOS AL NACER

El organismo humano es un ambiente propicio para los microbios, repleto como está de proteínas, grasas e hidratos de carbono. Muchos virus han sabido medrar con mesura en él, sin hacer enfermar a su anfitrión.

EN SÍNTESIS

El organismo humano alberga unos 380 billones de virus, diez veces más que de bacterias. Aunque algunos de ellos son perjudiciales y nos provocan enfermedades, la mayoría simplemente conviven con nosotros.

En los últimos años se han realizado grandes progresos en la identificación y localización de los virus en el cuerpo, que alcanzan incluso el cerebro. Muchos son bacteriófagos: no se multiplican en nuestras células, sino en las bacterias de nuestro organismo.

Las investigaciones recientes revelan que podemos aprovechar el conocimiento sobre nuestro viroma para mejorar el diagnóstico y el tratamiento de numerosas enfermedades humanas.

Puesto que todo virus necesita invadir una célula para multiplicarse, por fuerza ha de ser hábil en explotar cualquier oportunidad que se le presente en el cuerpo humano. Hace una docena de años, el abaratamiento de la secuenciación del genoma nos llevó a descubrir infinidad de virus en la cavidad bucal y en el intestino. Allá por 2013 se localizaron en la piel y las vías respiratorias, en la sangre y la orina, pero desde entonces los hemos encontrado también en otros lugares más sorprendentes. En septiembre de 2019, junto con Chandrabali Ghose y otros colaboradores publicamos un artículo sobre los virus que descubrimos en el líquido cefalorraquídeo de personas adultas sometidas a pruebas por diversas enfermedades. Pertenecían a varias familias y no estaban asociados a ninguna dolencia conocida. También hallamos los mismos en el plasma sanguíneo, en el líquido sinovial que lubrica las articulaciones y en la leche materna. Sabíamos que algunos virus infecciosos pueden introducirse en el líquido cefalorraquídeo, entre ellos los del herpes, pero el hallazgo de otros supuso una sorpresa. Hasta ahora considerado un medio estéril, el sistema nervioso central está colonizado por una comunidad vírica bastante diversa.

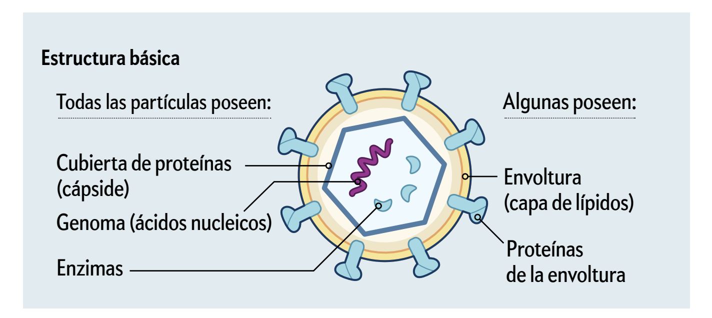
Parece que nuestro viroma comienza a crecer desde el mismo momento de nacer. Los estudios indican que el intestino del lactante ya alberga una gran diversidad de virus a los pocos días de vida, lo cual induce a pensar que seguramente procedan de la madre y que una parte sería ingerida con la leche. Algunos disminuyen durante las primeras semanas y meses de vida, mientras que otros penetran en el cuerpo a través del aire, el agua, los alimentos y el contacto con otras personas. Los virus se multiplican y ganan en diversidad infectando a las células, en cuyo interior persistirán años. El viroma del lactante es inestable, en tanto que el del adulto es bastante constante. Los anillovirus (*Anellovirus*), una familia formada por 200 especies, acaban estando presentes en casi todos nosotros conforme crecemos. Esto refleja lo que observamos con las bacterias.

Muchos de los moradores víricos del cuerpo no atacan a nuestras células, sino que acechan a las bacterias del microbioma

DATOS BÁSICOS

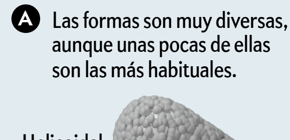
¿Qué es un virus?

Los virus son partículas biológicas sumamente minúsculas, constituidas por hebras de ADN o ARN rodeadas por una cubierta de proteínas (cápside). Solo pueden multiplicarse con la ayuda de una célula hospedadora a la que infectan. Se clasifican en virtud de su forma (A), de la célula hospedadora (B) o de su material genético (C).

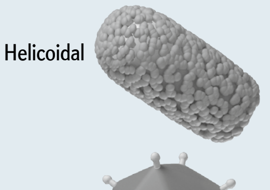


(A) Las formas son muy diversas, aunque unas pocas de ellas son las más habituales.

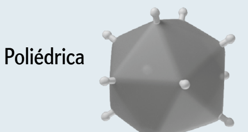
Helicoidal



Poliédrica



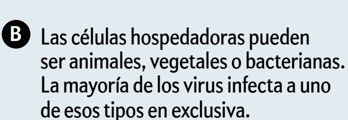
Esférica



Compleja

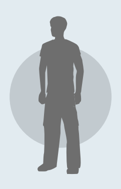




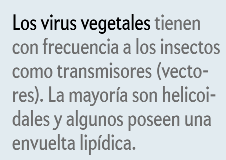


(B) Las células hospedadoras pueden ser animales, vegetales o bacterianas. La mayoría de los virus infecta a uno de esos tipos en exclusiva.

Los virus animales suelen circular dentro de una clase o familia zoológica, pero algunos pueden saltar de unas a otras. Por ejemplo, los poliomavirus infectan a los mamíferos y las aves, y los herpesvirus, al ser humano y a los monos.



Los virus vegetales tienen con frecuencia a los insectos como transmisores (vectores). La mayoría son helicoidales y algunos poseen una envuelta lipídica.





Los bacteriófagos infectan a las células bacterianas. Una vez dentro, fabrican copias de sí mismos o permanecen latentes.



(C) La información genética se almacena en una molécula de ARN o ADN, ambas correspondientes a ácidos nucleicos. La configuración de las moléculas es diversa.

Virus de ARN

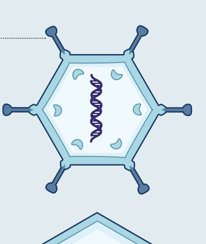
Los virus de la gripe A, B y C contienen una hebra de ARN de distinta longitud. Tanto el sistema inmunitario como los fabricantes de vacunas tienen problemas para mantenerse a la par con las mutaciones que surgen sin cesar.

Los flavivirus causan la fiebre amarilla, la fiebre del Nilo Occidental y el zika, todos transmitidos por mosquitos. Están provistos de una hebra de ARN monocatenario, rodeada por una envuelta.



Virus de ADN

Los adenovirus son responsables de una amplia gama de enfermedades, pero también se usan en terapia génica. Presentan un segmento lineal de ADN bicatenario.



Los recién descubiertos redondovirus conforman un grupo de 19 tipos que albergan un círculo de ADN monocatenario.



ILUSTRACIÓN DE AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

humano. Conocidos como virus bacteriófagos, o fagos, se introducen en las células bacterianas, se apoderan de su maquinaria para fabricar copias de sí mismos y luego escapan súbitamente y en tropel para infectar a nuevas bacterias, causando en el proceso la muerte de sus anfitrionas. Los bacteriófagos son casi ubicuos en la naturaleza. Si uno busca con detenimiento, los hallará en el suelo, en cualquier masa de agua, desde el mar hasta el propio grifo de casa, y también en ambientes extremos, como las minas ácidas, el Ártico o los manantiales hidrotermales. Incluso los hay suspendidos en el aire. Persisten en todos esos lugares porque cazan las bacterias que habitan en ellos. El ser humano es solo otro terreno de caza más.

En 2017, Sophie Nguyen y Jeremy Barr, entonces en la Universidad de California en San Diego (UCSD), demostraron en un estudio que muchos fagos atraviesan las mucosas para llegar hasta su destino final en el cuerpo. En los experimentos de laboratorio se abrieron paso a través de las membranas que recubren el intestino, los pulmones, el hígado, los riñones e incluso el encéfalo. Ahora bien, si por azar penetran en lugares como el sistema nervioso central, donde escasean las bacterias, no hallan un lugar donde multiplicarse y acaban por desaparecer.

UN PERFIL PERSONAL DE VIRUS

El viroma puede variar en gran medida de una parte a otra del cuerpo. Al trabajar con Ghose hallamos virus en sitios inesperados, y averiguamos también que los bucales son distintos de los intestinales, y estos, a su vez, de los presentes en la orina o la sangre. Entonces sabíamos que allí vivían las bacterias, pero hasta ese momento carecíamos de datos suficientes sobre los virus. Es fácil encontrar voluntarios que escupan en un frasco, pero no lo es tanto que accedan a facilitar muestras de heces o de sangre, ni convencer a las universidades de que autoricen la toma y el análisis de ese tipo de muestras. Una vez que las obtenemos, el material debe ser filtrado para eliminar las bacterias y quedarnos con diminutos fragmentos de virus. Estos los examinamos al microscopio y los introducimos en una máquina de secuenciación que identifica los ácidos nucleicos que codifican los genes. Por suerte, hemos avanzado lo suficiente en esta labor y ya podemos adivinar qué parte del cuerpo estamos examinando solo con mirar los virus que están presentes.

Junto con mi colega de la universidad Melissa Ly hemos demostrado también que es posible averiguar si dos personas no emparentadas conviven en el mismo lugar al comparar sus respectivos viromas. Cada uno de nosotros acoge un viroma sustancialmente distinto del de los demás, pero las personas que cohabitan comparten en torno al 25 por ciento de los virus. Estos no solo pasan de un conviviente a los otros por las vías habituales de contagio, como la tos, sino a través del contacto esporádico y al compartir el lavamanos, el inodoro, la mesa o la comida. Aunque hasta la fecha solo hemos estudiado pequeños grupos de personas, los datos indican que los compañeros de habitación que no mantienen un vínculo amoroso comparten un porcentaje similar de virus que aquellos que sí lo mantienen. El contacto íntimo no parece marcar una gran diferencia; basta con convivir en el mismo espacio.

Aun así, el rompecabezas no es sencillo. Shira Abeles, también de la UCSD, ha descubierto grandes diferencias en el viroma bucal del hombre y la mujer; la razón podría residir en las hormonas, pero no está demostrado. Sabemos que el viroma varía considerablemente en virtud de la región geográfica. Por ejemplo, resulta menos diverso en los ciudadanos de los países

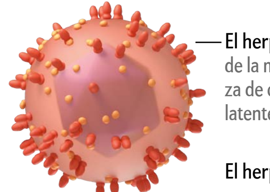
MICROBIOLOGÍA

El viroma humano

Nuestro cuerpo está plagado de virus que surgen y desaparecen o que persisten durante años. Algunas familias, como la de los herpesvirus, causan diversas enfermedades. Otras, menos conocidas, podrían ser benignas, incluso aquellos presentes en casi todos los humanos, como crAssphage.

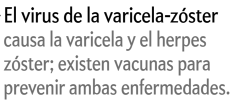
Herpes: el camaleón

Existen más de 100 herpesvirus, ligeramente distintos entre sí. Nueve infectan al ser humano, entre los que destacan:

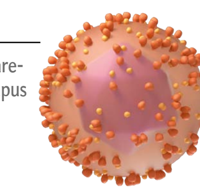


El herpes simple de tipo 1 es el responsable de la mayoría de las calenturas. A semejanza de otros herpesvirus, puede permanecer latente en las neuronas.

El herpes simple de tipo 2, causante de la mayoría de los herpes genitales, es transmitido por el contacto físico entre los individuos.



El virus de la varicela-zóster causa la varicela y el herpes zóster; existen vacunas para prevenir ambas enfermedades.



El virus de Epstein-Barr causa la mononucleosis y aparece asociado también con el lupus y varios tipos de cáncer.

Los citomegalovirus poseen uno de los genomas más largos de todos los virus humanos; a veces están implicados en neumonías.

Abundante pero misterioso: crAssphage

Los fagos son virus que infectan a las bacterias. El crAssphage lo presentan todas las personas, así como las termitas, las raíces de las plantas, el agua subterránea y los sedimentos marinos. No está claro su efecto en las personas, pues hasta el momento no existen indicios que lo vinculen a ninguna enfermedad. Recibe ese nombre por el programa informático que lo descubrió entre los datos obtenidos de heces humanas.

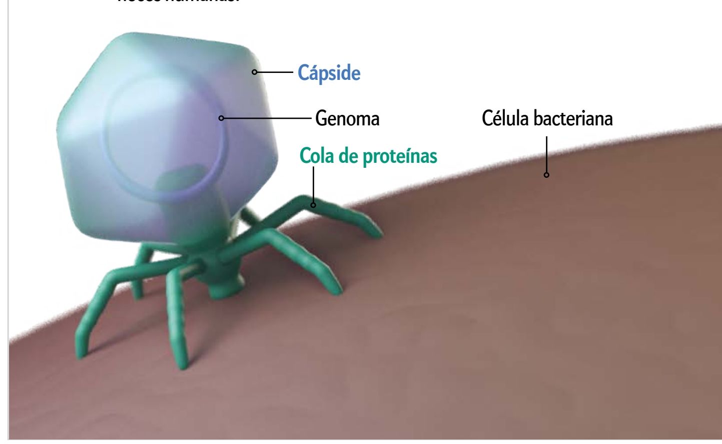
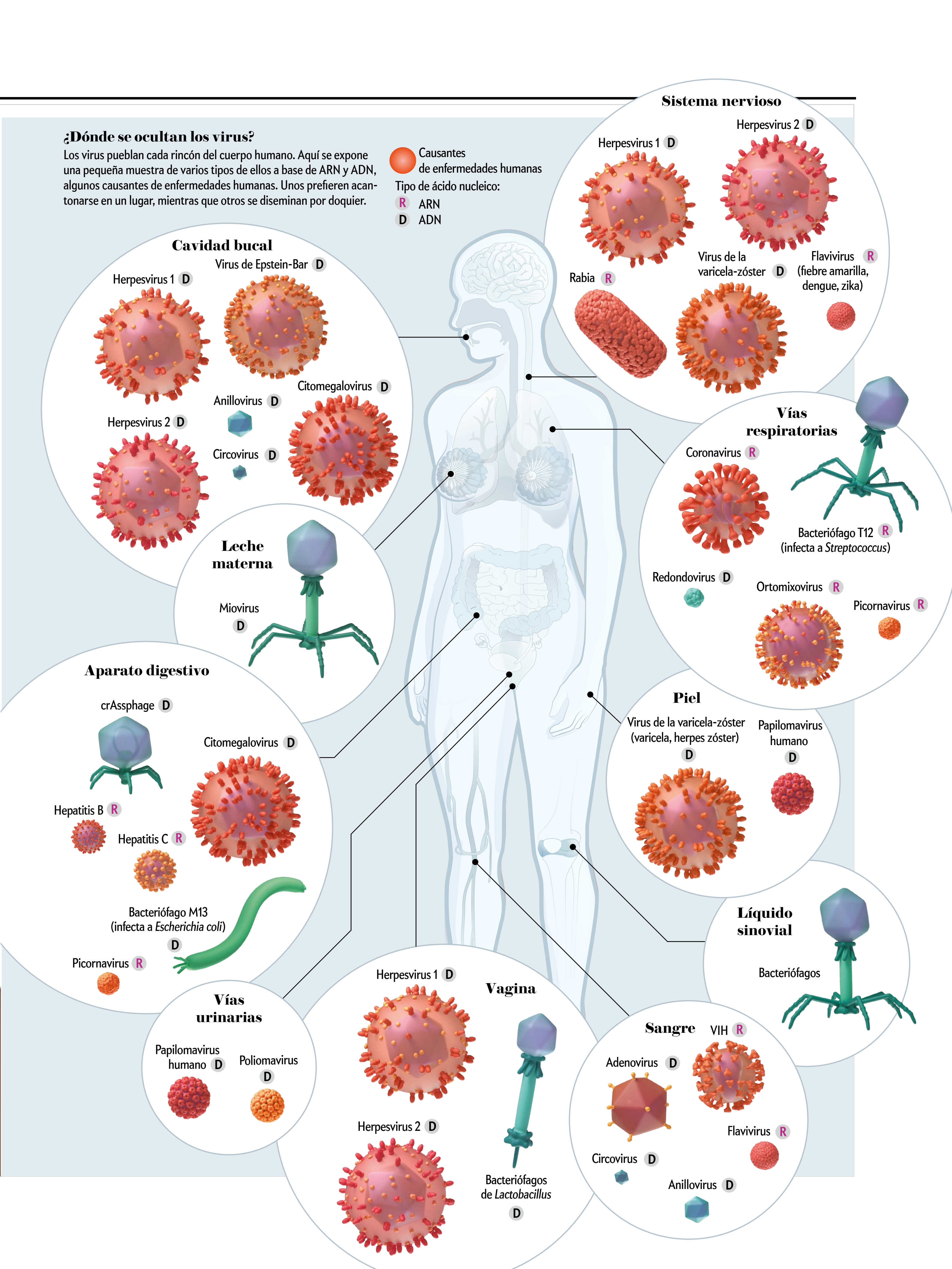


ILUSTRACIÓN DE AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO



¿Dónde se ocultan los virus?
Los virus pueblan cada rincón del cuerpo humano. Aquí se expone una pequeña muestra de varios tipos de ellos a base de ARN y ADN, algunos causantes de enfermedades humanas. Unos prefieren acantonarse en un lugar, mientras que otros se diseminan por doquier.
Causantes de enfermedades humanas
Tipo de ácido nucleico:
R ARN
D ADN
Sistema nervioso
Herpesvirus 1 D
Herpesvirus 2 D
Rabia R
Virus de la varicela-zóster D
Flavivirus R (fiebre amarilla, dengue, zika)
Cavidad bucal
Virus de Epstein-Bar D
Herpesvirus 1 D
Anillovirus D
Citomegalovirus D
Herpesvirus 2 D
Circovirus D
Vías respiratorias
Coronavirus R
Bacteriófago T12 R (infecta a Streptococcus)
Redondovirus D
Ortomixovirus R
Picornavirus R
Leche materna
Miovirus D
Aparato digestivo
crAssphage D
Citomegalovirus D
Hepatitis B R
Hepatitis C R
Bacteriófago M13 (infecta a Escherichia coli) D
Picornavirus R
Piel
Virus de la varicela-zóster (varicela, herpes zóster) D
Papilomavirus humano D
Líquido sinovial
Bacteriófagos
Vías urinarias
Papilomavirus humano D
Poliomavirus D
Vagina
Herpesvirus 1 D
Herpesvirus 2 D
Bacteriófagos de Lactobacillus D
Sangre
VIH R
Adenovirus D
Flavivirus R
Circovirus D
Anillovirus D

occidentales que en los originarios de otros países, unas diferencias que podrían obedecer a la alimentación y al ambiente.

¿VAGABUNDOS O GORRONES?

Numerosos integrantes del viroma humano infectan a las bacterias, pero una pequeña proporción infecta directamente a las células de nuestros tejidos. Cabe pensar que son minoría porque nuestro sistema inmunitario los aniquila. Iwijn De Vlaminck, mientras investigaba en la Universidad Stanford, demostró en un estudio que, cuando el sistema inmunitario de una persona queda fuertemente debilitado —por ejemplo, a raíz del trasplante de un órgano y del tratamiento inmunodepresor que evita el rechazo—, la presencia de ciertos virus aumenta de forma drástica. En tales casos se observa un incremento tanto de los virus perjudiciales como de los inocuos. De este hecho se deduce que en circunstancias normales el sistema inmunitario mantiene bajo control el viroma, pero cuando queda alterado, los virus no tardan en proliferar.

Ese tipo de oportunismo podríamos estarlo presenciando con la COVID-19. Los enfermos por el virus SARS-CoV-2, en especial los graves, pueden sufrir otras infecciones concurrentes. La más frecuente consiste en una neumonía bacteriana secundaria, o bacteremia (aumento de las bacterias que circulan en la sangre), a cargo de especies como *Staphylococcus aureus* o *Streptococcus pneumoniae*. Con menos frecuencia vemos también otras infecciones víricas simultáneas, entre ellas la gripe y las provocadas por el virus respiratorio sincitial o los adenovirus. Y también pueden activarse algunos miembros del viroma hasta entonces latentes, como el virus de Epstein-Barr o los citomegalovirus. En suma, cuando el sistema inmunitario anda empeñado contra la COVID-19, el paciente resulta más vulnerable a los brotes de otros virus.

Pese a su carácter depredador, muchos fagos viven en armonía con sus presas durante largo tiempo, a veces hasta el extremo de no entrar nunca en acción. Un virus no es más que una cápsula de proteínas que encierra una molécula con instrucciones genéticas: el genoma vírico. Cuando un fago infecta a una bacteria, inserta su genoma en el de ella. Y aunque ciertos virus comienzan a multiplicarse de inmediato y acaban matando a la bacteria que los ha acogido, otros permanecen inactivos en su interior, sumidos en estado de latencia, una suerte de hibernación. Es probable que esta sea una estrategia de supervivencia: cuando la bacteria se divide, crea una copia de su genoma y, al mismo tiempo, otra del genoma del fago. En este modelo, la supervivencia del huésped depende de la supervivencia de la hospedadora, así que el virus tiene sumo interés en que esta sobreviva. Que esa estrategia lo beneficia es obvio, pero no lo es tanto qué ventaja reporta a la bacteria. Sea como fuere, parece ser que multitud de bacterias de nuestro cuerpo han crecido habituadas a convivir con ellos.

Cuando la oportunidad surge, el fago sumido en latencia despierta y fabrica una progenie numerosa que mata a la célula anfitriona. A veces los fagos nacientes se llevan consigo genes bacterianos. Esa carga extra puede beneficiar en ocasiones a la siguiente bacteria infectada. Así, por ejemplo, en la saliva he encontrado fagos portadores de genes que ayudan a las bacterias a burlar al sistema inmunitario. Incluso incorporan genes que confieren resistencia a los antibióticos. Ningún fago necesita un gen de ese tipo, pues es inmune a ellos, pero cuando lo transmiten a una bacteria facilita la supervivencia de su hospedadora y, con ello, la suya propia. Este tipo de transferencia es frecuente.

No acaba ahí la protección que un fago puede proporcionar a su anfitriona. La bacteria *Pseudomonas aeruginosa*, conocida sobre todo por ser causante de neumonías, es también responsable de otro tipo de afecciones. A las personas aquejadas de ciertas neumopatías, como la fibrosis quística, les resulta prácticamente imposible erradicarla de los pulmones, aunque tomen antibióticos diseñados para acabar con ella. Algunas bacterias de esta especie han incorporado en su genoma lo que llamamos fagos filamentosos. En 2019, una investigación encabezada por un grupo de Stanford, en el que figuraban Elizabeth Burgener y Paul Bollyky, descubrió que los fagos filamentosos forman un manto protector, consistente en capas de carbohidratos y de proteínas, donde las bacterias se ocultan de los antibióticos. Permanecen así resguardadas, y una vez que los fármacos desaparecen, pueden seguir infectando otro día más.

Por el mero hecho de habitar en el mismo espacio, los convivientes comparten alrededor del 25 por ciento de su viroma

VIRUS ALIADOS

Creo que no es muy aventurado preguntarse si sería posible aprovechar los virus del cuerpo en beneficio de nuestra salud. Ya hemos descubierto algunos casos en que esto ocurre de forma natural. Cuando los fagos viajan por el cuerpo en busca de bacterias, algunos se unen a las células superficiales de las membranas mucosas, como las que tapizan la cavidad nasal, la garganta, el estómago o el intestino. No pueden multiplicarse en ellas, pero aguardan a una presa que pase por allí.

Este proceso podría protegernos de ciertas enfermedades, al menos en teoría. Supongamos que ingerimos un alimento contaminado por salmonelas. Si, al llegar a la mucosa del estómago, estas bacterias se topasen con los fagos, nada impediría en principio que estos pudiesen infectarlas y acabaran con ellas antes de que cayésemos enfermos. Los fagos actuarían *de facto* como un componente más del sistema inmunitario, que nos protegería contra ciertos patógenos. Nadie ha demostrado lo anterior todavía, pero en 2019 un estudio de un grupo finlandés demostró que, en los cerdos y en la trucha arcoiris, los fagos persisten unidos a la mucosidad hasta siete días, lo que protege al animal contra un tipo de bacteria infecciosa.

Un fago que está acaparando la atención de los investigadores es crAssphage, descubierto en 2014 por Bas Dutilh, del Instituto Radboud de los Países Bajos. Los estudios llevados a

cabo desde entonces han revelado su presencia en la mayoría de los habitantes del planeta, a excepción de las tribus ancestrales de cazadores-recolectores, según parece. No es habitual que un mismo virus esté tan vastamente difundido, y hasta ahora nadie lo ha vinculado con ninguna enfermedad. Los entendidos creen que controla la prevalencia de una bacteria abundante en el intestino llamada *Bacteroides*. De ser así, podríamos servirnos de este fago para mejorar los trastornos gastrointestinales. Es tal su presencia en las heces humanas que hoy se analiza si se halla en el agua potable para descartar la contaminación por aguas negras.

A los médicos les interesan vivamente los fagos que puedan contrarrestar la rápida propagación de las bacterias resistentes a los antibióticos, pues el desarrollo de nuevos antibióticos ha quedado muy a la zaga de ellas. La Organización Mundial de la Salud calcula que en 2050 ese tipo de patógenos causarán cada año 10 millones de muertes como mínimo, de ahí que sea esencial hallar nuevos tratamientos alternativos. Hace más de cien años que conocemos los fagos, pero las tentativas de usarlos como medio para combatir las bacterias nocivas no han cosechado grandes éxitos. A partir de los años cuarenta del siglo xx los antibióticos los sustituyeron en casi todo el mundo, debido a su eficacia netamente superior y a su facilidad de uso. Ahora algunos investigadores médicos los miran con nuevos ojos, como el equipo de la Universidad Rockefeller, que ha empleado una enzima de fago para luchar contra la infección por estafilococos resistentes a la meticilina.

Durante años, la mayoría de los facultativos han sido reticentes a su administración porque temían que el sistema inmunitario pudiese reaccionar de forma desmesurada y desatar niveles peligrosos de inflamación. Los fagos destinados a uso terapéutico se cultivan en bacterias, y si estas no son eliminadas por completo antes de la administración, podrían desencadenar una respuesta inmunitaria exagerada. Hoy disponemos de métodos más refinados para purificar los fagos, y los temores ante posibles reacciones adversas se han disipado en gran parte.

Lo que de veras limita su empleo como tratamiento contra las enfermedades infecciosas es la dificultad de encontrar virus que sean realmente eficaces. Hace muchos años que los investigadores peinan los entornos naturales en busca de fagos que sean activos contra las bacterias perjudiciales para los humanos. Ahora que sabemos que abundan en las heces, la saliva y los esputos, nos hemos percatado de que las depuradoras de aguas residuales son una de las fuentes más ricas de fagos.

Algunos de ellos ya se están administrando a título experimental. En un caso histórico acaecido en 2016, del que estuvo a cargo Robert Schooley, adscrito también a la UCSD, un equipo médico trató con fagos extraídos de aguas residuales, entre otras fuentes ambientales, a Tom Patterson, profesor de la misma institución afectado por una insuficiencia multiorgánica causada por *Acinetobacter baumannii*, una bacteria notable por su resistencia a los antibióticos. Hoy vive para contarlo.

FOMENTO DE LA SALUD

A medida que sepamos más sobre el papel que desempeñan los virus en el viroma humano, podríamos descubrir más posibilidades de tratamiento. Alejandro Reyes, de la Universidad de Washington en San Luis, ha comprobado que los fagos del ratón modelan las comunidades bacterianas de este roedor, si bien no es posible asegurar si son los virus o las bacterias los que cambian primero. Si son las comunidades víricas, entonces modificarán las poblaciones bacterianas en su provecho. Y si son estas las primeras, los virus simplemente se adaptarán para poder introducirse en las bacterias remodeladas. Los investigadores han comprobado que los viromas varían de forma notable en el marco de la periodontitis y de la enfermedad inflamatoria intestinal.

Aunque nos llevará mucho tiempo desentrañar el viroma humano, es importante contemplar lo mucho que hemos avanzado en apenas diez años. Hace una década muchos pensaban que el microbioma era una suerte de capa pasiva de microorganismos en el interior del cuerpo, concentrados sobre todo en el intestino. Ahora sabemos que algunas de sus partes son, en efecto, bastante estables, pero que otras son dinámicas y cambiantes. Y comienza a entreverse que los actores más versátiles pueden ser los virus. En 2018, en un estudio de tejido cerebral donado por fallecidos de alzhéimer se descubrieron altos niveles de herpesvirus. Más tarde, en un trabajo publicado en mayo de 2020, investigadores de la Universidad Tufts y del Instituto de Tecnología de Massachusetts infectaron un organoide cerebral con el virus del herpes simple 1 y vieron cómo quedaba plagado de placas amiloideas similares a las que se observan en el cerebro de los enfermos de alzhéimer. Resulta impactante darse cuenta de que es posible descubrir efectos tan destacables en virus que son viejos conocidos.

A medida que indaguemos quizá descubramos nuevos tipos de virus que influyen en la salud humana, así como nuevos medios de explotarlos para modificar nuestro microbioma y protegernos contra las enfermedades. Si averiguamos cómo mantener a raya a los virus perjudiciales y favorecer a los beneficiosos, podremos convertirnos en superorganismos más fuertes. IyC

PARA SABER MÁS

Human oral viruses are personal, persistent and gender-consistent. Shira R. Abeles et al. en *The ISME Journal*, vol. 8, págs. 1753-1767, marzo de 2014.
Transmission of viruses via our microbiomes. Melissa Ly et al. en *Microbiome*, vol. 4, artículo n.º 64, diciembre de 2016.
A 3D human brain–like tissue model of herpes-induced Alzheimer's disease. Dana M. Cairns et al. en *Science Advances*, vol. 6, n.º 19, eaay8828, mayo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El ecosistema microbiano humano. Jennifer Ackerman en *IyC*, agosto de 2012.
Los bacteriófagos, unos eficaces antimicrobianos. Lucía Fernández Llamas, Diana Gutiérrez y Pilar García en *IyC*, marzo de 2017.
¿Vuelve la fagoterapia para quedarse? Charles Schmidt en *IyC*, marzo de 2020.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Cultivo de supercristales a gran velocidad: el ejemplo de la hoganita

Una forma rápida de obtener voluminosos cristales de acetato de cobre mediante aparatos tan cotidianos como una yogurtera y una huevera

*** El experimento**

Construiremos una caja de crecimiento cristalino mediante evaporación forzada por calentamiento, a partir de una yogurtera tuneada con un termostato y el uso de cloruro cálcico para absorber la humedad. Nos permitirá desarrollar nuestras habilidades en la síntesis de compuestos y su purificación por cristalización —¡casi un arte!—.

*** Materiales**

Retales de tubo de cobre
Cargador de teléfono móvil (en desuso)
Yogurtera (en desuso)
Termostato con sonda o Arduino
Huevera
Recipientes de cristal
Filtros de cafetera
Pinzas
Espátulas
3 o 4 litros de ácido acético (vinagre)
250 ml de agua oxigenada al 30 %
Cloruro cálcico (desecante doméstico)
Bicarbonato sódico

*** Precio aproximado**

100 euros (la reutilización de buena parte de los componentes puede reducir los costes a menos de la mitad).

*** Tiempo**

Construcción del instrumental: horas
Síntesis del acetato de cobre: horas
Cristalización: semanas

La hoganita es un mineral raro que se encuentra en unas pocas localidades. Fue descubierto en 2002 por Graham P. Hogan, ingeniero de minas australiano a quien debe el nombre, y no es nada más —ni nada menos— que un acetato de cobre de origen natural. Su rareza es tal, que la aparición de ciertas muestras provenientes del norte de África hizo sospechar que eran falsas. En efecto, sintetizar hoganita en el laboratorio es relativamente fácil. Basta con tomar virutas o fragmentos de cobre lo más pequeños posible, añadir unas gotas de ácido acético más o menos diluido y... esperar. Al cabo de unos días habrán aparecido unas costras azules que denotarán la presencia del acetato de cobre. Si reproducimos el proceso sobre un fragmento de algún mineral de cobre (malaquita, por ejemplo), obtendremos imitaciones (de la hoganita) muy perfectas. Pero, por desgracia de los impacientes, el proceso es lento. Si lo que pretendemos no es emular la naturaleza, sino conseguir de forma rápida cristales voluminosos y bien formados (para participar, por ejemplo, en un concurso de cristalografía), el proceso debe trasladarse al laboratorio y llevarse a cabo de forma más científica.

En esta ocasión, pues, proponemos una ruta para la síntesis rápida del acetato de cobre, en cantidades notables y de pureza suficiente para la cristalización de grandes muestras de buena calidad. El experimento es interesante porque requiere la aplicación de métodos diversos y permite la aproximación a sofisticadas técnicas de laboratorio con los materiales propios de un *biohacker*. Es aplicable a la cristalización de muchas otras sustancias y goza de un amplio margen de maniobra a la hora de conseguir los materiales y aparatos necesarios.

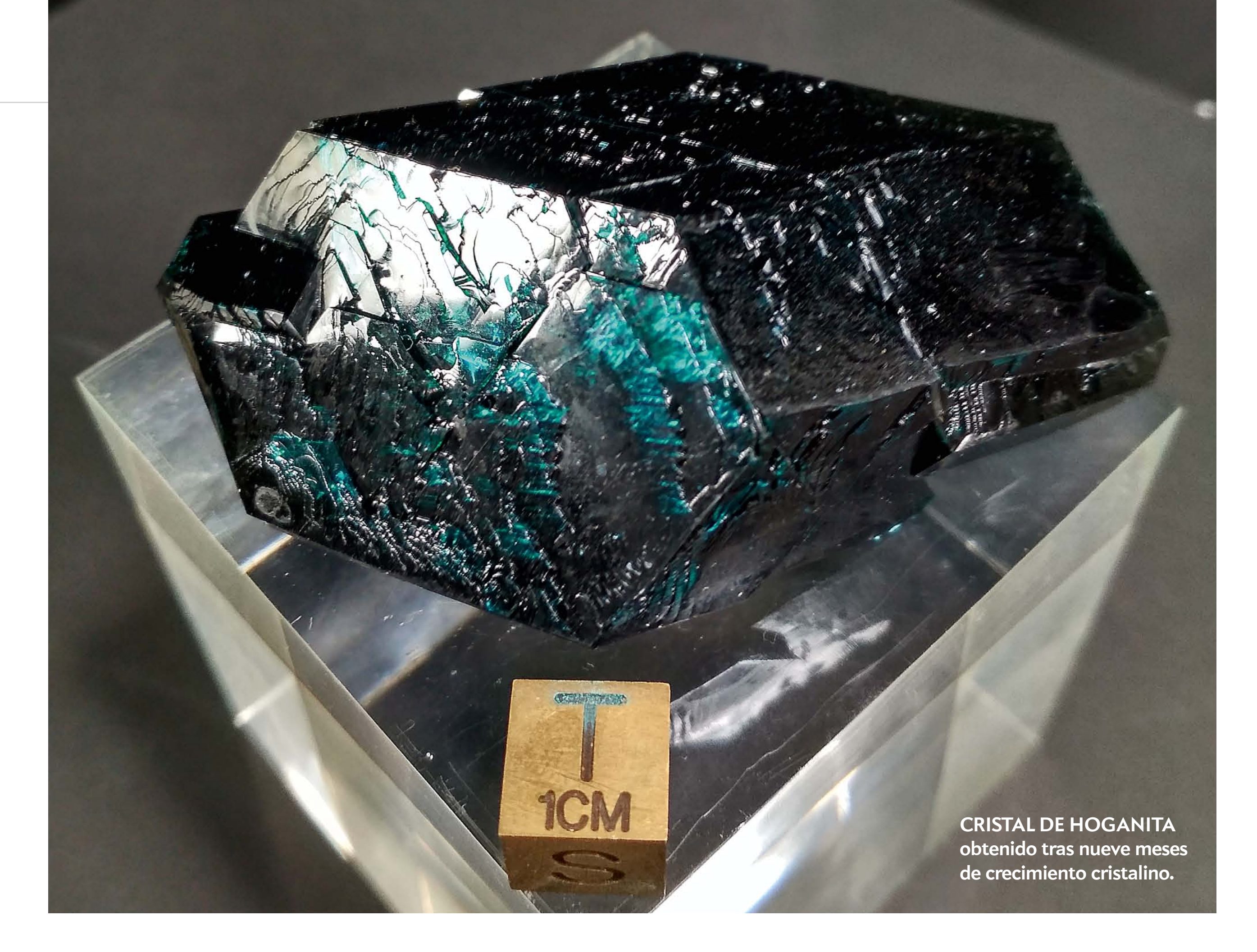
El proceso se divide en dos partes principales. La primera, que nos llevará varias horas, corresponde a la síntesis del acetato de cobre y se subdivide en la obtención electrolítica de cobre en polvo, su oxidación y posterior ataque con ácido acético. La segunda parte, mucho más larga, consiste en la preparación de una disolución estable y su posterior cristalización acelerada. Vayamos por pasos.

Construcción del instrumental

Tomemos un vaso cilíndrico de un litro de capacidad. Cortemos luego dos trozos de tubo de cobre, que serán nuestros electrodos de sacrificio. Deben ser algo más largos que la altura del vaso y tener un diámetro de 10, 12 o más milímetros. Busquemos algún sistema que los mantenga suspendidos en el interior del vaso sin que toquen el fondo y de forma que nos permita ajustar su separación.

Rellenemos el vaso con vinagre «de limpieza» (lo encontraremos en cualquier supermercado). Normalmente tiene una concentración de ácido acético del 10 por ciento, más que suficiente para nuestro propósito. Aunque el acético no presenta el riesgo extremo de otros ácidos, para su manipulación utilizaremos gafas y guantes de protección y trabajaremos en un espacio ventilado.

Buscaremos ahora una fuente de alimentación de corriente continua. Servirá un cargador de móvil. (Si no tenemos ninguno, en comercios de electrónica, ferreterías y bazares orientales podemos encontrar fuentes de alimentación con un regulador de voltaje de entre 3 y 12 voltios.) Cortaremos el conector del extremo del cable y en cada uno de los dos hilos montaremos una pinza de cocodrilo que conectaremos a los tubos de cobre. Ahora sí, podemos comenzar el experimento.



CRISTAL DE HOGANITA obtenido tras nueve meses de crecimiento cristalino.

1 Electrólisis

Empezaremos por la obtención electrolítica del acetato de cobre, proceso en el que, por una vez en la vida, esperamos obtener el peor resultado posible. Expliquémonos. Normalmente, cuando queremos obtener un depósito electrolítico esperamos un recubrimiento sólido, liso, continuo y adherente. En este caso, en cambio, nuestro objetivo es producir cobre en polvo, así que someteremos la célula a una electrolisis «brutal». Conectaremos las pinzas a los electrodos de cobre, regularemos la tensión a 6 o 9 voltios y ajustaremos la separación entre los tubos a tres o cuatro centímetros. Inmediatamente empezarán a pasar cosas.

Observemos los electrodos. Están recubriéndose de pequeñas burbujas de gas. En el ánodo (el polo positivo) son más abundantes: es hidrógeno. En el cátodo, lo son menos: es algo de oxígeno. En realidad, no solo se está electrolizando el ácido. También se está descomponiendo el agua. Pero esto ahora no nos importa. Lo interesante es que sobre el electrodo negativo se va formando, poco a poco, una capa pulverulenta e irregular de cobre. Al principio la reacción arranca lentamente. Pero, con el paso de los minutos, se acelera. Al cabo de unas pocas horas, el recubrimiento se ha ramificado, formando preciosos crecimientos fractales que amenazan con cortocircuitar los electrodos. Ha llegado el momento de desprender esos depósitos mediante una varilla o pincel.

Si repetimos la operación varias veces obtendremos un fino polvo de cobre electrolítico que se acumulará en el fondo de la cubeta a la vez que uno de los dos electrodos desaparece. Un electrodo de tubo de cobre de 15 milímetros de diámetro y 150 de longitud produce, totalmente disuelto, más de 60 gramos de polvo. Una cantidad suficiente para nuestro experimento.

Sacaremos, pues, los electrodos —o lo que quede de ellos—, decantaremos el electrolito y lo guardaremos herméticamente cerrado. No suframos si queda algo de líquido en el fondo de la cubeta; al contrario, siempre es mejor si dejamos el polvo de cobre sumergido. El motivo es simple: como tantos otros metales recién preparados, el cobre que ahora tenemos es muy reactivo, ya que su superficie es granulosa y está exenta de óxidos que moderen su reactividad.

Ahora traslademos nuestra cubeta, con el polvo de cobre en el fondo, al interior de otro recipiente de mayor tamaño, una fuente, por ejemplo. Prepararemos un baño de enfriamiento: para ello añadiremos agua en el recipiente exterior hasta que la cubeta casi empiece a flotar.

2 Oxidación del cobre

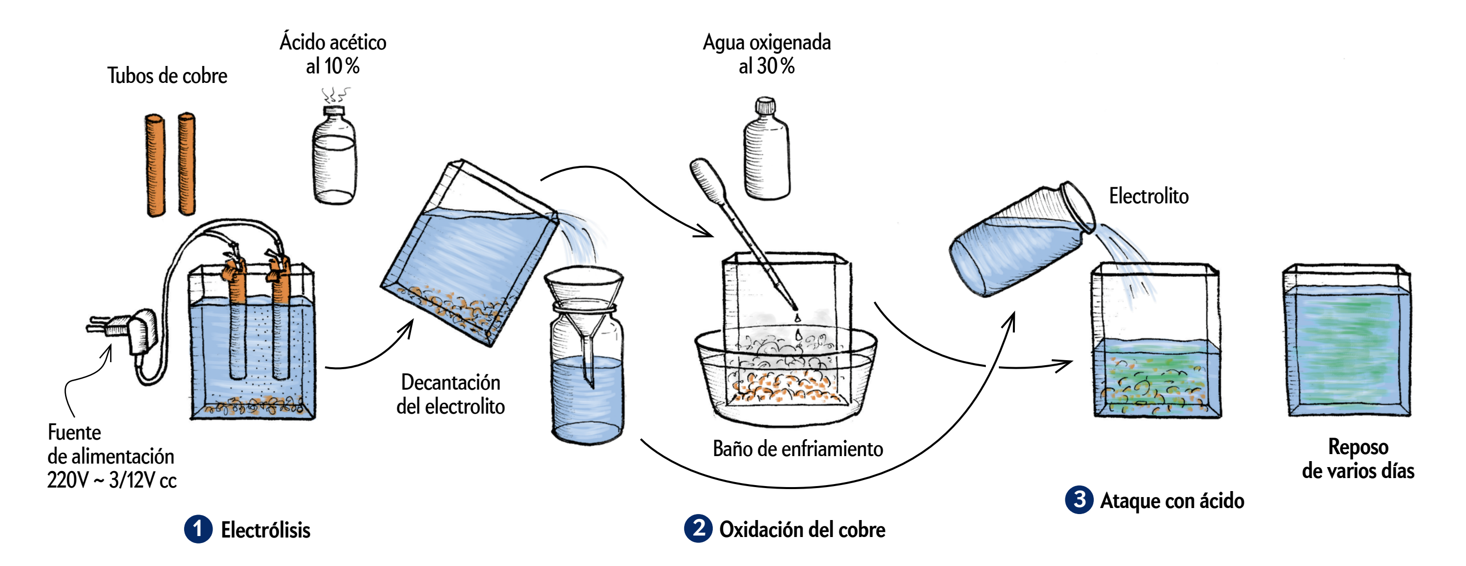
Ahora reguemos el polvo de cobre con unos pocos centímetros cúbicos de agua oxigenada. Inmediatamente empezará a formarse una abundante espuma de color marrón. Estamos produciendo óxido de cobre a toda velocidad, y más si se tiene en cuenta que el óxido obtenido cataliza la descomposición del agua oxigenada y que esta descomposición es fuertemente exotérmica —de ahí que hayamos situado la cubeta en un baño de agua que modera la temperatura—.

Terminada la efervescencia, aportaremos otra dosis de peróxido de hidrógeno, una vez y otra, hasta que el polvo rojo haya mutado en un líquido siruposo de color casi negro. Terminado este paso, dispondremos de una buena cantidad de óxido de cobre, que ahora vamos a convertir en acetato de cobre.

3 Ataque con ácido

También poco a poco, mezclaremos (o reuniremos) de nuevo el electrolito, es decir, el ácido acético que antes habíamos guardado, con el polvo de cobre ya oxidado, y

ILUSTRACIONES Y FOTOGRAFÍA DE MARC BOADA FERRER



dejaremos en reposo la mixtura durante varios días.

Al principio, la disolución presenta un feo color verde oscuro, mezcla de los óxidos y acetatos en formación; más tarde, terminada la reacción, se aclara y transmuta en un líquido azul cobalto, diáfano y transparente.

4 Filtración y estabilización

Comienza ahora la segunda parte del experimento. Tenemos acetato de cobre en disolución óptima para su cristalización, pero antes debemos estabilizarlo. Tras el reposo, filtraremos el líquido mediante filtros de papel de cafetera «americana» y lo acumularemos en botes herméticos, donde reposará unos días más.

El objetivo es eliminar toda impureza y, sobre todo, garantizar que nuestra disolución de acetato de cobre está en su justa concentración. (Recordemos que las disoluciones muy saturadas tienden a formar cristales llenos de maclas, costras y precipitados indeseables.) Por otro lado, descubriremos que, una vez filtrado, en el líquido del fondo queda óxido de cobre para otros ataques ácidos. Así pues, añadiremos a ese residuo acético fresco y, una vez finalizado el ataque, también lo filtraremos y almacenaremos a temperatura ambiente. Repetiremos el proceso hasta agotar los reactivos. Con todo ello habremos conseguido uno o dos litros de disolución que servirán para alimentar el crecimiento de los cristales en los meses siguientes.

La cristalización es un proceso lento, y más si la sal en cuestión es tan poco soluble como el acetato de cobre, del que solo se disuelven poco más de siete gramos en 100 ml de agua. Por contra, este maravilloso compuesto presenta una tendencia natural a la buena cristalización. Permite —si tenemos la paciencia suficiente— cultivar cristales individuales muy regulares y, además, cuando forma maclas estas son especialmente estéticas. Para obtener un buen cristal, lo primero que tendremos que hacer es conseguir un buen germen cristalino.

5 Obtención de los gérmenes de cristalización

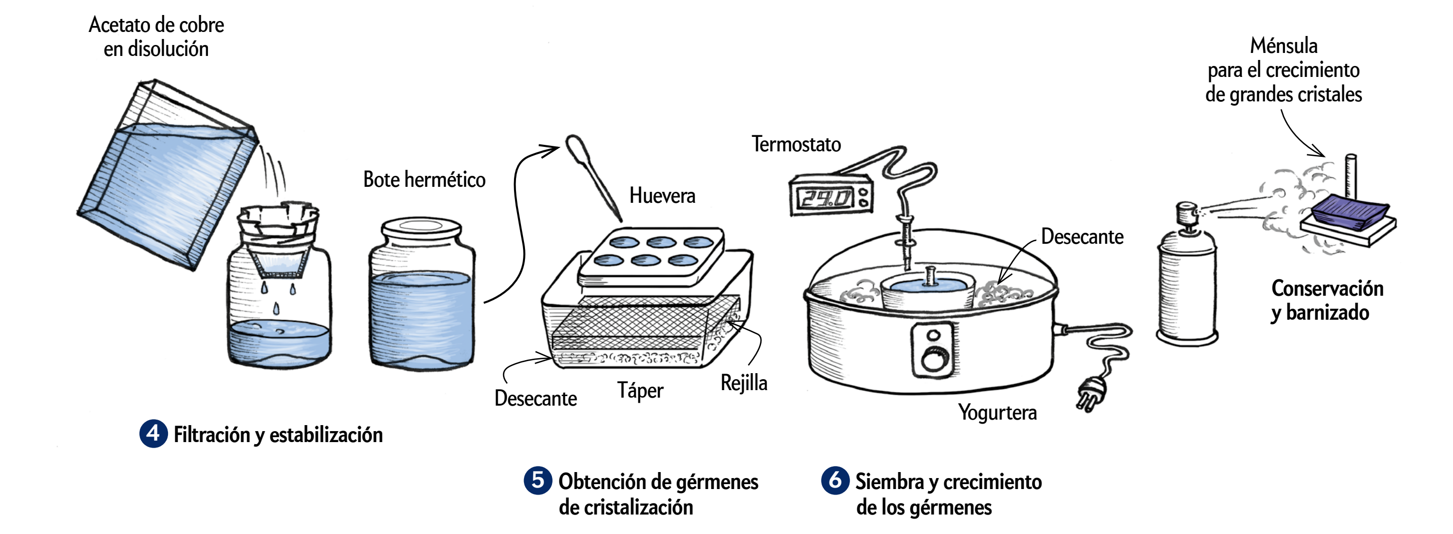
Nos adentramos ahora en una técnica experimental que, más que científica, es casi artesanal; y, por si no fuera bastante difícil, para obtener buenos gérmenes de cristalización necesitamos producir muchas semillas para seleccionar luego las óptimas. Lo ideal es poner un poco de disolución filtrada y estabilizada a temperatura ambiente en una cápsula de Petri, abandonar gotas individuales sobre una superficie de plástico o, mejor aún, poner pequeñas cantidades de disolución en las cavidades de una huevera que habremos cortado por la mitad.

Pero, a diferencia de las cristalizaciones típicas (en las que evaporamos agua), aquí el acetato precipita a partir de soluciones ácidas, de forma que durante la evaporación se producen abundantes, aromáticos y tóxicos vapores de ácido acético. Por eso colocaremos la huevera en el interior de un pequeño contenedor de plástico con tapa hermética (un táper), junto con la máxima cantidad posible de un desecador, el cloruro cálcico, que, además, absorberá los efluvios acetosos. Lo encontraremos en el supermercado en forma de desecante antihumedad doméstico. Típicamente es una bolsita de cloruro de calcio granulado, que dispondremos formando una capa uniforme en todo el interior del contenedor. Para que la huevera no quede en contacto con el desecante, colocaremos una rejilla alzada, nunca de hierro, que, además, facilitará la aireación.

El líquido se evaporará rápidamente y aparecerán pequeños cristales en el seno de la disolución. Son las deseadas semillas, los gérmenes que seleccionaremos mediante una lupa y luego haremos crecer. Escogeremos los más grandes, perfectos, regulares o singulares y los colocaremos en una nueva cavidad junto con una pequeña cantidad de disolución. Repetiremos este proceso cuantas veces sea necesario. Los cristales defectuosos, costras y depósitos los retornaremos al ciclo.

Hay una norma casi general para el crecimiento cristalino: si queremos conseguir cristales rápidamente y lo más perfectos posible, el recipiente donde evaporamos la disolución debe tener una superficie libre de dimensión equiparable a la superficie exterior del cristal en crecimiento. Eso significa que los cristales pequeños necesitan recipientes muy pequeños y que solo los cristales de gran tamaño requieren volúmenes también superiores. Pero ello también significa que deberemos renovar las disoluciones con gran frecuencia (para evitar que parte de la sal se deposite fuera del cristal, en forma de costras o de nuevos gérmenes).

PARTE II: CRISTALIZACIÓN



6 Siembra y crecimiento de los gérmenes

Llegados a la fase final de cristalización, descubrimos que deberemos evaporar litros de vinagre, a la mayor velocidad posible y al amparo de perturbaciones exteriores como la precipitación de polvo o las corrientes de aire persistentes. Y todo ello sin quedar intoxicados.

La solución es simple y viene usándose desde muy antiguo: recurriremos a un cristalizador o desecador (como ya hemos hecho para obtener los gérmenes) y añadiremos un elemento acelerador, el caldeamiento controlado.

De todos los electrodomésticos que suelen dormir arrinconados en los armarios más inaccesibles de nuestra cocina, el más reciclable —para fines experimentales— es, quizá, la yogurtera. Para el científico autónomo, se trata de un aparato estupendo. Trabaja a temperatura óptima para el crecimiento bacteriano, gasta poco, es hermético (o casi) y, atención, fácilmente manipulable. Tanto es así que, con una yogurtera, un Arduino, una sonda de temperatura y una cuantas cápsulas de Petri con medios de crecimiento adecuado, puede uno improvisar un mini armario de cultivo para todo tipo de bichos vivos y, naturalmente, para el crecimiento acelerado de cuerpos inertes como los cristales.

Por tanto, tomemos una yogurtera en desuso. Perforemos la tapa para introducir la sonda de temperatura y regulemos el termostato, Arduino o lo que sea, a unos 28 o 30 ºC. Luego tomemos otra bolsita de cloruro de calcio y dispongamos los gránulos formando un pequeño montón en todo el perímetro interior de la yogurtera. Justo en su centro, colocaremos el recipiente donde haremos crecer los cristales. Pongamos disolución en cantidad suficiente y sumerjamos las semillas de mayor tamaño. Cerremos la tapa y esperemos unos días.

Al principio, los gérmenes crecen rápidamente, ya que un pequeño depósito incrementa en mucho el volumen del cristal. Al cabo de unos días (pocos), el nivel de la disolución ha bajado varios milímetros y empiezan a formarse costras en las paredes del vaso. Ha llegado el momento de renovar la disolución madre, que ha envejecido tomando un color verdoso. Por tanto, llenaremos un nuevo recipiente con la disolución estable a temperatura ambiente que tenemos almacenada. Trasladaremos los cristales y los colocaremos de nuevo en el evaporador. A continuación, transvasaremos la disolución vieja a un recipiente donde la estabilizaremos durante unos días y la filtraremos de nuevo para retornarla al ciclo; los depósitos formados los disolveremos con algo de acético y también los retornaremos al ciclo.

Los filtros usados (que serán muchos), los almacenaremos en un recipiente hermético con acético en el fondo. Ello nos permitirá rescatar unos últimos restos de acetato de cobre. En relación con los residuos, debemos recordar que las sales de cobre solubles son tóxicas para numerosos organismos. Antes de deshacernos de los distintos sobrantes líquidos, deberemos estabilizar los residuos con una disolución de bicarbonato de sodio, de la que precipitará carbonato de cobre insoluble y, por tanto, muy inerte y fácil de filtrar y recuperar.

Este es uno de esos experimentos en los que la paciencia es el todo. En pocas semanas, nuestros cristales alcanzarán dimensiones de entre 10 y 12 milímetros. En pocos meses, de varios centímetros. Su manipulación exigirá cada vez mayor delicadeza. Ya no bastará con unas finas pinzas, o con espátulas y cucharas. Lo mejor será construir un soporte y moverlos siempre sobre este. Esta ménsula nos servirá para extraer el cristal de la disolución sin tocarlo. Una vez crecido y bien seco, lo barnizaremos para que se conserve durante años, al abrigo del CO_2 atmosférico, que, de otro modo, lo atacaría, haciéndole perder lustre y color.

El método que acabamos de describir duplica o triplica el ritmo de la evaporación natural. Con ello conseguimos que el crecimiento de los cristales sea realmente aceleradísimo. Naturalmente, la técnica es perfecta para la obtención de muchas otras especies cristalinas. Un caso extremo es el del sulfato de cobre, una sal cuatro veces más soluble que el acetato y, por tanto, mucho más fácil de cristalizar. A unos 30 o 32 ºC de temperatura de evaporación podemos obtener, en poco más de dos meses, ¡cristales que ocupan la palma de nuestra mano! IyC

EN NUESTRO ARCHIVO

Materia cristalina. Marc Boada Ferrer en *IyC*, mayo de 2014.

El efecto ajolote. Sergio Quintana et al. en *IyC*, octubre de 2019.

Obtención de compuestos de potasio. Marc Boada Ferrer en *IyC*, abril de 2010.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

La hipótesis de Riemann (III)

Un secreto escondido en el plano complejo

En nuestra última entrega vimos que era posible encontrar una expresión aproximada para determinar cuántos números primos hay por debajo de un número natural dado en el límite en el que dicho número es grande. Sin embargo, eso queda aún muy lejos del secreto que desde hace siglos obsesiona a los matemáticos: encontrar una fórmula explícita para la distribución de los números primos.

Quizás sorprenda al lector saber que se conocen muchas fórmulas exactas para la función contador de los números primos. En 1964, por ejemplo, Hugh C. Williams definió la función aritmética

$$F(n) = \left\lfloor \cos^2 \left(\pi \, \frac{(n-1)! + 1}{n} \right) \right\rfloor ,$$

donde n es un número natural y $\lfloor\ \rfloor$ denota la parte entera. Esta función vale 1 cuando n es primo y 0 en caso contrario. A partir de ella, podemos encontrar una sencilla expresión para la función contador de los números primos:

$$\pi(n) = \sum_{j=1}^{n} F(j)$$

¿Cómo es posible? En realidad, esta fórmula explícita no aporta nada que los matemáticos no supieran desde hacía mucho tiempo. Esconde el teorema de Wilson, un resultado conocido ya en el siglo XI por el matemático árabe Alhacén y que afirma que cualquier número natural n es primo si y solo si $(n-1)! + 1$ es divisible por n.

Volvamos ahora a la expresión de $F(n)$. La función coseno devuelve valores entre –1 y 1, de modo que su cuadrado lo hace entre 0 y 1. Así que la parte entera del coseno al cuadrado valdrá siempre 0 o 1. Y $F(n)$ valdrá 1 solo cuando la expresión $((n-1)! + 1)/n$ sea entera, algo que únicamente ocurre si n es primo. Dado que para computar $\pi(n)$ de esta manera hemos de sumar todos los valores de $F(j)$ desde $j = 1$ hasta n, en realidad tenemos que determinar número a número si es primo o no. Y esto ya se parece más al algoritmo de Euclides que a una fórmula explícita «sin trampa ni cartón».

Esta situación es extensible a todas las fórmulas conocidas que, como la de Williams, no son más que maneras ingeniosas de codificar en su interior los propios números primos. Para avanzar en la búsqueda de una verdadera función contador, los matemáticos introdujeron los métodos analíticos de variable compleja en la teoría de números. Para ver por qué, comencemos dando un pequeño rodeo que nos permitirá examinar la notable potencia de estos métodos.

Enteros gaussianos

Consideremos la famosa fórmula de Leibniz para el número π:

$$1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + \cdots = \pi/4 .$$

La manera habitual de demostrar que esta suma infinita es igual a $\pi/4$ pasa por convertirla en una integral cuyo resultado es la función arcotangente. Sin embargo, siempre que en una expresión aparece el número π hay algún círculo implícito. ¿Dónde está escondido el círculo en este caso?

Lo sorprendente es que la respuesta hay que buscarla en el plano complejo. Fíjese en las imágenes del recuadro que aparece en la página siguiente. En ellas se muestra el plano complejo reticulado, donde los vértices (a, b) del retículo se corresponden con números complejos $a + bi$ en los que tanto la parte real como la imaginaria son enteros. Este conjunto de números complejos se conoce con el nombre de «enteros gaussianos».

Puesto que cada escaque de nuestra cuadrícula tiene área unidad, podemos estimar el área πR^2 de un círculo de radio R centrado en el origen contando el número de enteros gaussianos que encierra, una aproximación cuyo error relativo será menor cuanto más grande sea R. Esto nos permite estimar π como el cociente entre la cantidad de enteros gaussianos contenidos en el círculo y R^2. ¿Cómo podemos calcular su número con exactitud?

Observemos que, por el teorema de Pitágoras, por todo entero gaussiano (a, b) pasa una circunferencia centrada en el origen de radio

$$r = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{n} ,$$

donde n es necesariamente un natural, ya que a y b son enteros. Por tanto, podemos contar cuántos puntos encierra un círculo de radio $R = \sqrt{N}$ sumando los puntos incluidos en las sucesivas circunferencias concéntricas de radios $r = \sqrt{n}$, donde $n = 0, 1, 2..., N$. Por ejemplo, para calcular el número de puntos contenidos en un círculo de radio $R = \sqrt{5}$, sumaríamos cuántos puntos contienen respectivamente las circunferencias de radios $r = \sqrt{0}, \sqrt{1}, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \sqrt{4}$ y $\sqrt{5}$.

En el recuadro vemos que, para $n = 0$, la circunferencia de radio 0 presenta un único punto de corte: el origen. Para $n = 1$, la circunferencia de radio 1 muestra 4 puntos de corte: 1, –1, i y $-i$. Para $n = 2$, la circunferencia de radio $\sqrt{2}$ tiene también 4 puntos de corte: $1 + i$, $1 - i$, $-1 + i$ y $-1 - i$. Para $n = 3$, la circunferencia de radio $\sqrt{3}$ no posee puntos de corte.

Si seguimos con circunferencias cada vez mayores, obtendremos la sucesión

$$1, 4, 4, 0, 4, 8, 0, 0, 4, 4, 8, 0...$$

Esta sucesión nos permite calcular cuántos enteros gaussianos contiene el círculo de radio $R = \sqrt{5}$ sumando sus seis primeros términos:

$$1 + 4 + 4 + 0 + 4 + 8 = 21.$$

Factorizar en el plano complejo

Observemos que todos los puntos de corte aparecen siempre en parejas conjugadas; es decir, en pares de números complejos de la forma $a + bi$ y $a - bi$. Por ejemplo, para $r = \sqrt{5}$ hay un total de 8 puntos de corte, o enteros gaussianos, repartidos en

forma de 4 parejas conjugadas. Veamos por qué.

El motivo por el que aparece la pareja conjugada $1 + 2i$ y $1 - 2i$ es que

$$(1 + 2i)(1 - 2i) = 1^2 + 2^2 = 5\ .$$

De modo que un entero gaussiano será un punto de corte con la circunferencia de radio r si al multiplicarlo por su conjugado nos da r^2. Siendo así, a partir de una pareja conjugada podemos obtener un total de cuatro parejas conjugadas distintas multiplicando los miembros de la pareja por -1, i y $-i$. En nuestro ejemplo, las parejas conjugadas resultantes son

$$(-1 + 2i)(-1 - 2i) = 5\ ,$$
$$(2 + i)(2 - i) = 5\ ,$$
$$(-2 + i)(-2 - i) = 5\ ,$$

lo que nos da los 8 puntos de corte.

En general, para determinar el número de puntos de corte para la circunferencia de radio $r = \sqrt{n}$, debemos factorizar el número n en el plano complejo y escribirlo como un producto de todas las parejas conjugadas de enteros gaussianos posibles.

Consideremos ahora qué ocurre con las circunferencias de radio $r = \sqrt{n}$ en las que n es un número primo. En el primer artículo de esta serie vimos que todo número primo mayor que 2 puede siempre escribirse, o bien como $4m + 1$, o bien como $4m + 3$, donde $m = 0, 1, 2...$ (y donde, recordemos, esto no quiere decir que todos los números que pueden expresarse de este modo sean primos).

Llegados aquí es posible demostrar dos resultados clave. En primer lugar, si n es un número primo de la forma $4m + 3$ (como 3, 7, 11...), es imposible factorizarlo en una pareja de enteros gaussianos conjugados. Geométricamente, esto se traduce en que la circunferencia asociada no presentará puntos de corte con el retículo de enteros gaussianos, como hemos visto para el caso $r = \sqrt{3}$, ya que es imposible expresar 3 como la suma de dos cuadrados.

En segundo lugar, si n es un número primo de la forma $4m + 1$ (como 5, 13, 17...), siempre podrá factorizarse en dos enteros gaussianos conjugados, de modo que las circunferencias asociadas a estos valores tendrán 8 puntos de corte (el resultado de multiplicar esos enteros gaussianos por -1, i y $-i$).

¿Qué ocurre para las circunferencias de radio $r = \sqrt{n}$ en las que n es un número compuesto? En tal caso, siempre podremos descomponerlo en sus factores primos y después factorizar estos últimos en enteros gaussianos.

Por ejemplo, si $n = 15 = 3 \cdot 5$, vemos que

$$15 = 3(1 + 2i)(1 - 2i)\ .$$

En este caso es imposible escribir el resultado como un producto de un par conjugado, de modo que la circunferencia asociada no presentará puntos de corte. En cambio, si nuestro número es $n = 45 = 3^2 \cdot 5$, podremos repartir los treses y escribirlo como una pareja conjugada:

$$45 = 3(1 + 2i) \cdot 3(1 - 2i)\ ,$$

lo que nos vuelve a dar 8 puntos de corte en la circunferencia asociada.

El número pi y los números primos

Las sucesiones $4m + 1$ y $4m + 3$ recorren todos los números impares. Los pares pueden expresarse de la forma $2m$ (la cual, por cierto, incluye el único primo que no puede escribirse de una de las dos maneras anteriores; es decir, el 2). Ahora considere la siguiente función definida sobre los números naturales y a la que llamaremos χ («ji»):

$$\chi(4m + 1) = 1\ ,$$
$$\chi(4m + 3) = -1\ ,$$
$$\chi(2m) = 0\ .$$

Como puede ver en el maravilloso vídeo del matemático Grant Sanderson en su canal de YouTube 3Blue1Brown citado en la bibliografía, esta función nos permite calcular el número de enteros gaussianos contenidos en una circunferencia de radio $r = \sqrt{n}$ mediante el siguiente algoritmo: calculamos todos los divisores de n, computamos el valor de χ para cada uno de ellos, sumamos todos esos valores y multiplicamos el resultado por 4.

Por ejemplo, para el número 45, los divisores son 1, 3, 5, 9, 15 y 45. De modo que calculamos

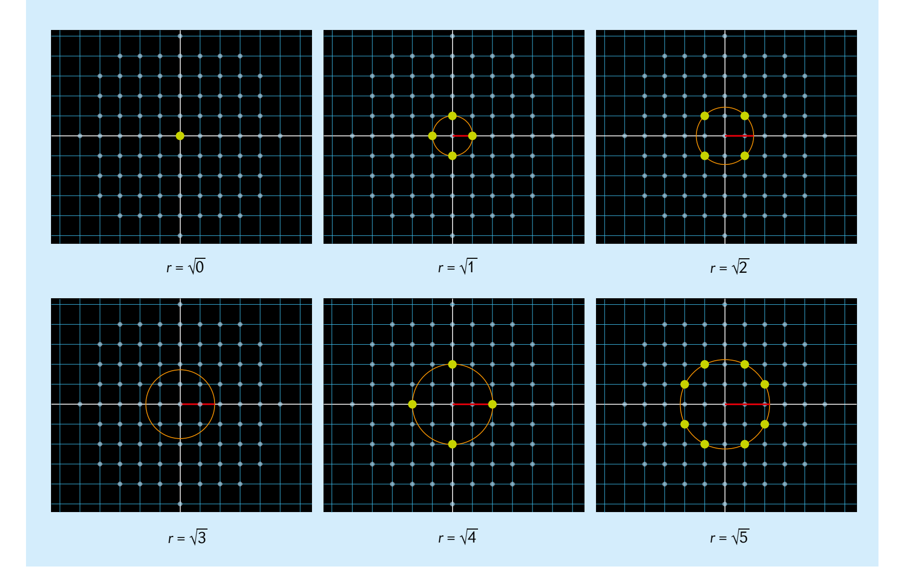
$$\chi(1) + \chi(3) + \chi(5) + \chi(9) + \chi(15) + \chi(45)$$
$$= 1 - 1 + 1 + 1 - 1 + 1 = 2\ ,$$

que multiplicado por 4 nos dice que hay 8 puntos de corte.

LOS ENTEROS GAUSSIANOS Y EL NÚMERO PI

Una manera de estimar el valor del número π consiste en dividir el plano en un retículo de cuadrados de área unidad y contar los vértices que se encuentran en el interior de un círculo de tamaño dado. Ese número de vértices será aproximadamente igual al área del círculo, lo que dividido por el valor del radio al cuadrado nos dará una estimación de π. Si interpretamos el plano como el conjunto de los números complejos, tales vértices corresponden a los llamados «enteros gaussianos»: números complejos en los que tanto la parte real como la imaginaria son números enteros.

Para calcular cuántos enteros gaussianos caben en el interior de un círculo de radio $R = \sqrt{N}$, podemos considerar las circunferencias centradas en el origen y de radios sucesivos $r = 0, \sqrt{1}, \sqrt{2}, \sqrt{3}..., \sqrt{N}$. El número de puntos que buscamos coincide con el número de vértices contenidos en cada una de esas circunferencias. Las ilustraciones inferiores muestran los casos correspondientes a circunferencias de radio 0, $\sqrt{1}$, $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$, $\sqrt{4}$ y $\sqrt{5}$.



No parece que hayamos simplificado las cosas, sino lo contrario. Sin embargo, este truculento rodeo para hallar los enteros gaussianos contenidos en una circunferencia de radio dado nos permitirá hallar el patrón oculto que conduce al número π.

En la tabla inferior hemos representado el proceso para los primeros 9 números naturales. En primer lugar comprobamos que (salvo el factor de 4 y el 1 inicial) el resultado se corresponde efectivamente con la sucesión que mencionábamos al principio:

$$1, 4, 4, 0, 4, 8, 0, 0, 4, 4, 8, 0...$$

Pero, lo que es más importante, ahora vemos una regularidad que, de no haber seguido este camino, se nos habría escapado: $\chi(1)$ aparece en todos los números, $\chi(2)$ en la mitad, $\chi(3)$ en la tercera parte, etcétera.

Recordemos que nuestro propósito era calcular el número π como la cantidad de enteros gaussianos que encierra el círculo de radio $R = \sqrt{N}$ dividido por N, y tomando el límite en el que N tiende a infinito. Por tanto:

$$\begin{aligned}\pi &= 4N(\chi(1) + \chi(2)/2 + \chi(3)/3 + \cdots)/N \\ &= 4(1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + \cdots)\,,\end{aligned}$$

donde el prefactor N aparece porque estamos sumando las contribuciones de todos los enteros (1, 2, 3, 4...), y donde no tenemos más que recordar que la función χ vale 0 para los números pares, +1 para los impares de la forma 1, 5, 9... y −1 para el resto. El resultado no es otro que ¡la famosa fórmula de Leibniz para el número π!

La función zeta de Euler

La relación que acabamos de ver entre los enteros gaussianos y el número π pone de manifiesto todo lo que podemos aprender cuando trasladamos al plano complejo algunas preguntas sobre los números reales. Retomemos ahora nuestro objetivo: encontrar una fórmula explícita para los números primos.

En 1737, Leonhard Euler estableció un puente entre la teoría de números y el análisis gracias a una función real definida como una serie infinita a la que llamó ζ («zeta»):

$$\zeta(x) = 1 + 1/2^x + 1/3^x + 1/4^x + 1/5^x + \cdots$$

Esta función se encuentra bien definida para los valores $x > 1$, donde las series son convergentes.

Euler observó que, al multiplicar esta función por $1/2^x$,

$$\zeta(x)/2^x = 1/2^x + 1/4^x + 1/6^x + 1/8^x + 1/10^x + \cdots\,,$$

en el resultado solo aparecían los números pares. Por tanto, si restamos esta expresión a la función original, obtendremos

$$\begin{aligned}\zeta(x) - \zeta(x)/2^x &= 1 + 1/3^x + 1/5^x + 1/7^x + 1/9^x + \cdots \\ &= (1 - 1/2^x)\zeta(x)\,,\end{aligned}$$

donde hemos eliminado de la serie original los múltiplos de 2.

Repitiendo la misma operación sobre este resultado, pero ahora con el siguiente número primo, el 3, vemos que

$$\begin{aligned}&(1 - 1/2^x)\zeta(x)/3^x = \\ &1/3^x + 1/9^x + 1/15^x + 1/21^x + 1/27^x + \cdots\,,\end{aligned}$$

lo que nos deja los múltiplos de 3 que no son al mismo tiempo múltiplos de 2.

Si ahora restamos de nuevo las dos últimas expresiones,

$$\begin{aligned}&(1 - 1/2^x)\zeta(x) - (1 - 1/2^x)\zeta(x)/3^x = \\ &1 + 1/5^x + 1/7^x + 1/11^x + 1/13^x + \cdots = \\ &(1 - 1/2^x)(1 - 1/3^x)\zeta(x)\,,\end{aligned}$$

obtenemos una serie donde no aparecen los múltiplos de 2 ni de 3.

Euler razonó que, si seguíamos repitiendo la operación con los sucesivos números primos, acabaríamos eliminando todos los términos de la serie original menos el primero, el 1. Así pues:

$$\left[\prod_{p\ \text{primo}} \left(1 - \frac{1}{p^x}\right)\right]\zeta(x) = 1$$

Esto le condujo al famoso «producto de Euler» para la función ζ, una relación inesperada entre los números naturales y los primos:

$$\zeta(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^x} = \prod_{p\ \text{primo}} \left(1 - \frac{1}{p^x}\right)^{-1}$$

Esta identidad sugiere que la función ζ «conoce» los números primos. Y, de hecho, Euler la utilizó para demostrar que existen infinitos primos.

Sin embargo, fue Bernhard Riemann quien dio un paso decisivo cuando, hacia 1859, decidió extender la función ζ al plano complejo, tal y como hemos hecho aquí con el ejemplo de los enteros gaussianos. Riemann definió

$$\zeta(s) = 1 + 1/2^s + 1/3^s + 1/4^s + 1/5^s + \cdots\,,$$

donde ahora s denota un número complejo. Como veremos en la próxima columna, la contribución genial de Riemann fue revelar que los ceros de la función ζ (aquellos números para los que $\zeta(s) = 0$) guardan nuestro ansiado secreto: el orden oculto en la distribución de los primos.

1	$\chi(1)$									= 1
2	$\chi(1)$	$+\chi(2)$								= 1
3	$\chi(1)$		$+\chi(3)$							= 0
4	$\chi(1)$	$+\chi(2)$		$+\chi(4)$						= 1
5	$\chi(1)$				$+\chi(5)$					= 2
6	$\chi(1)$	$+\chi(2)$	$+\chi(3)$			$+\chi(6)$				= 0
7	$\chi(1)$						$+\chi(7)$			= 0
8	$\chi(1)$	$+\chi(2)$		$+\chi(4)$				$+\chi(8)$		= 1
9	$\chi(1)$		$+\chi(3)$						$+\chi(9)$	= 1

DESCOMPOSICIÓN de los primeros nueve números naturales en sus respectivos divisores y cálculo de la suma de los valores de la función χ. Salvo por un factor total de 4, el resultado coincide con el número de enteros gaussianos contenidos en las circunferencias de radios $r = \sqrt{1}, \sqrt{2}, ..., \sqrt{9}$.

PARA SABER MÁS

Prime obsession: Bernhard Riemann and the greatest unsolved problem in Mathematics. John Derbyshire. Plume, 2004.

Stalking the Riemann hypothesis: The quest to find the hidden law of prime numbers. Dan Rockmore. Jonathan Cape, 2005.

Pi hiding in prime regularities. 3Blue1Brown. www.youtube.com/watch?v=NaL_Cb42WyY, 19 de mayo de 2017.

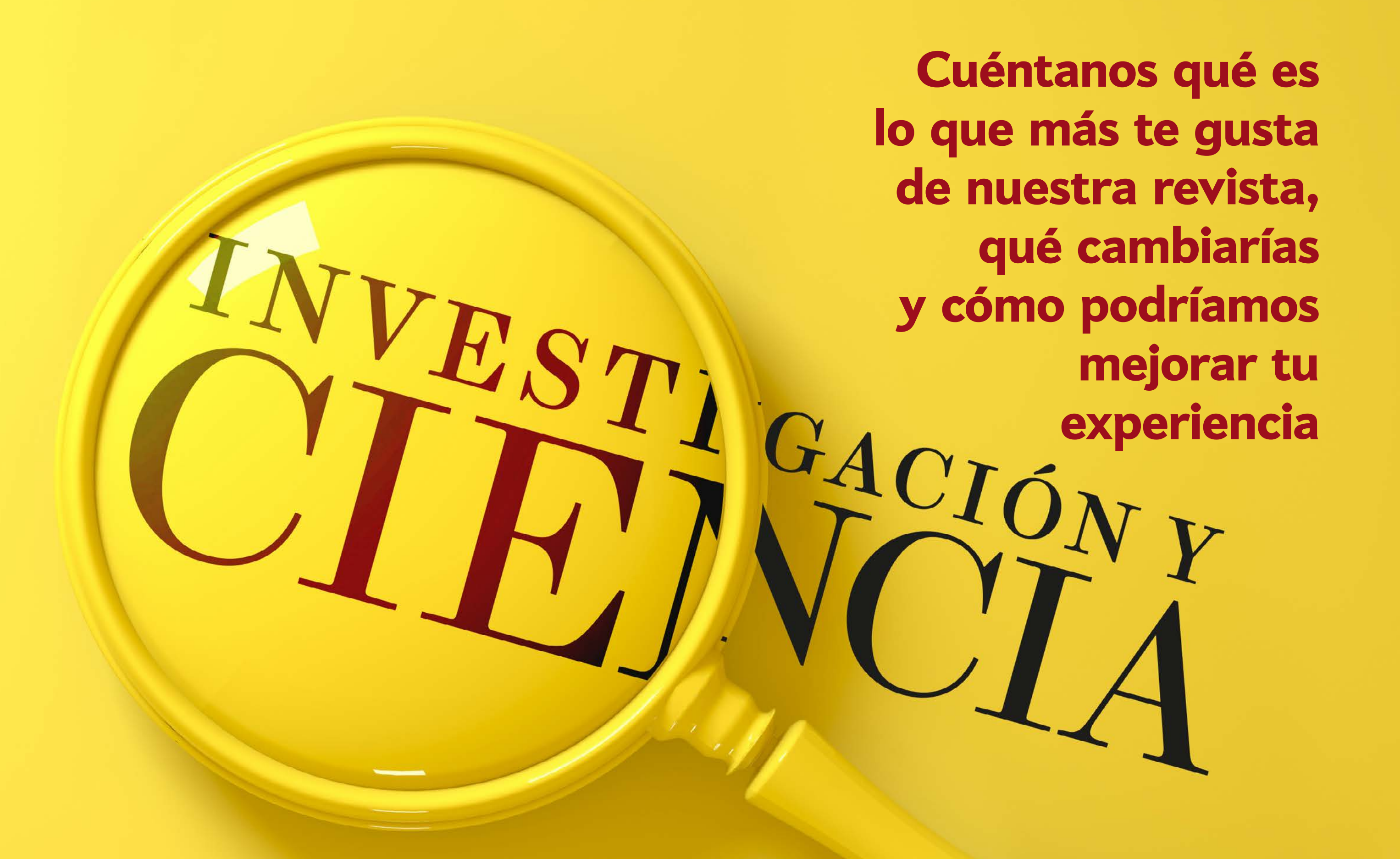
EN NUESTRO ARCHIVO

La hipótesis de Riemann (I). Bartolo Luque en *IyC*, diciembre de 2020.

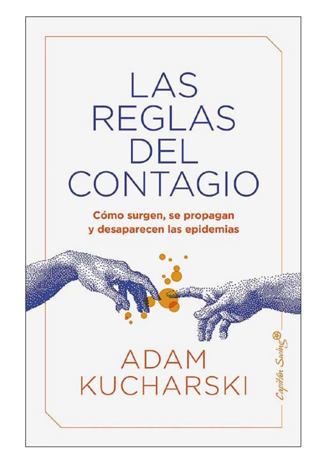
La hipótesis de Riemann (II). Bartolo Luque en *IyC*, enero de 2021.

NOS INTERESA MUCHO TU OPINIÓN.
¿NOS AYUDAS?

Cuéntanos qué es lo que más te gusta de nuestra revista, qué cambiarías y cómo podríamos mejorar tu experiencia



CLICA AQUÍ PARA ACCEDER A LA ENCUESTA



LAS REGLAS DEL CONTAGIO
CÓMO SURGEN, SE PROPAGAN Y DESAPARECEN LAS EPIDEMIAS
Adam Kucharski
Capitán Swing, 2020
352 págs.

El contagio en un mundo hiperconectado

Lecciones para afrontar la pandemia actual y prevenir otras en el futuro

Adam Kucharski es experto en modelos matemáticos aplicados a los brotes infecciosos. Profesor de 35 años en la Escuela de Higiene y Medicina Tropical de Londres, sus trabajos científicos en la última década han versado sobre gripe, ébola, zika, chikungunya y dengue. En los últimos meses, sus investigaciones se han focalizado en la infección por SARS-CoV-2, el coronavirus causante de la COVID-19.

En su versión original en inglés, *Las reglas del contagio* acabó de redactarse a principios de 2020, cuando comenzaba la pandemia actual. Fue un preludio de lo que estaba por llegar. La COVID-19 ha supuesto un revulsivo sin precedentes a escala mundial que ha modificado con rapidez nuestro modo de vivir. Las restricciones de movilidad, las medidas de distanciamiento social y la protección con mascarillas son, por el momento, las mejores herramientas para reducir la transmisión del nuevo coronavirus. Ahora tenemos la esperanza de que la vacuna ponga fin a la pandemia, pero el objetivo de inmunizar a toda la población constituye por sí solo un magnífico reto.

A lo largo de ocho capítulos, Kucharski narra de un modo ingenioso y divulgativo su experiencia personal y la de otros investigadores en la comprensión de la dinámica de varios brotes infecciosos en diferentes partes del mundo. La obra comienza describiendo las investigaciones sobre la malaria que el británico Ronald Ross realizó mientras hacía el servicio militar en la India hacia 1900. Fue él quien reveló el papel transmisor del mosquito y puso en marcha las primeras estrategias para combatir la enfermedad.

Aunque los brotes epidémicos crecen exponencialmente al principio, en algún momento se frenan debido a que el porcentaje de la población que es vulnerable a la enfermedad disminuye con el tiempo. La curva de expansión es sigmoidea y da cuenta de la «inmunidad de rebaño»; esto es, la protección que supone que una proporción de los individuos ya se haya infectado e inmunizado. De un modo divulgativo, Kucharski deja claro cómo, cuanto más contagiosa sea la enfermedad, mayor será la proporción de población inmunizada que hará falta para alcanzar la inmunidad de rebaño [*véase* «Cómo modelizar una pandemia», por Bartolo Luque, Fernando Ballesteros y Octavio Miramontes; Investigación y Ciencia, mayo de 2020]. Para la COVID-19, ese porcentaje de población inmunizada se estima entre el 50 y el 70 por ciento.

Kucharski se refiere a la «regla 80-20» para los contagios causados por superpropagadores. En muchos brotes epidémicos (también es el caso de la COVID-19), un 80 por ciento de los contagios tiene su origen en un 20 por ciento de los infectados. A modo de anécdota, narra la historia del supuesto «paciente cero» del sida, un auxiliar de vuelo al que, de forma errónea, se le atribuyó durante muchos años la introducción y diseminación del VIH en Estados Unidos. Hubo que esperar a los estudios filogenéticos para demostrar que el virus que infectaba a Gaëtan Dugas, que era el nombre del seropositivo, no fue el antecesor de las variantes del VIH que se extendieron por Norteamérica a finales de los setenta.

Kucharski describe también la propagación de diferentes comportamientos humanos mediante las redes sociales. Es el caso de la «obesidad por imitación» a partir del grupo más próximo en el que nos movemos. La modelización de estos comportamientos sociales mediante las reglas de la epidemiología resulta ser muy útil. De esta manera, el «contagio social» se convierte en una nueva área de conocimiento multidisciplinar que integra psicología y salud pública.

Refiriéndose a la persuasión en el contagio social, Kucharski narra uno de los episodios más vergonzosos de falsificación de pruebas que llevó a una revista científica de prestigio a retirar un artículo. En 2014, la revista *Science* publicó un trabajo firmado por Michael LaCour y Donald Green en el que concluían que una pequeña acción podía ejercer una influencia masiva: la prueba definitiva de la existencia de contagio social. LaCour, estudiante de la Universidad de California en Los Ángeles, evaluó la efectividad de entrevistas sobre un tema controvertido para, a continuación, pasar una encuesta y comprobar si se habían producido cambios de opinión. Contra todo pronóstico, así fue. LaCour afirmó que muchos sujetos cambiaron su opinión tras la entrevista. El tema en cuestión era el matrimonio homosexual, por lo que el artículo atrajo una amplia cobertura en los medios. «Sin duda, el artículo más importante del año», señaló un investigador. Más tarde, sin embargo, se dio a conocer que los resultados se habían inventado y que las entrevistas no se habían llevado a cabo. En 2015, la revista *Science* retiró el artículo.

Las reglas del contagio narra diferentes historias sobre la violencia y las relaciona con los mapas de brotes infecciosos. Kucharski afirma que también la violencia es, de algún modo, contagiosa. Es el caso de los homicidios en algunas zonas de EE.UU. o en Ruanda y su similitud con los brotes de cólera en Bangladés o Somalia. Con respecto a estos últimos, Kucharski se remonta al brote de cólera que asoló el Soho de Londres entre 1848 y 1854. Por entonces, la teoría de los miasmas postulaba que el cólera se propagaba a través de los malos olores del aire. Fue un anestesista, John Snow, quien descubrió que el cólera se transmitía a través del agua contaminada de una fuente. Al cerrar el surtidor se suprimió el brote, y eso que por entonces no se conocía la bacteria que produce la enfermedad, *Vibrio cholerae*. Los métodos de rastreo de casos e intervención sobre contactos han permitido que Cure Violence («Curemos la Violencia»), un programa del Gobierno estadounidense basado en métodos epidemiológicos, haya logrado reducir los tiroteos en las zonas más violen-

tas de Chicago y Baltimore. Este programa se aplica ahora con éxito en otras muchas partes del mundo.

En la promoción de la salud pública, una de las pioneras fue la enfermera Florence Nightingale, cuyas medidas de higiene fueron muy eficaces para las tropas británicas que combatían en la guerra de Crimea. Durante 1854, por cada soldado muerto por herida de combate, otros ocho fallecían por enfermedades como cólera, fiebre tifoidea, tifus y disentería. Lo que fueron los mapas de Snow para frenar el cólera en Londres lo fueron las gráficas estadísticas de Nightingale para reducir la mortalidad por falta de higiene.

Kucharski investigó el brote de ébola que entre 2013 y 2016 causó casi 30.000 muertos en Liberia, Sierra Leona y Guinea. La predicción de los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC) de EE.UU. fue de 1,4 millones de casos en los cinco meses siguientes si no se actuaba pronto. La noticia tuvo un gran impacto mediático y favoreció la movilización internacional, si bien fue exagerada. Para cuando se abrieron algunos de los grandes centros médicos en África occidental, la epidemia ya se había ralentizado. En realidad, los CDC habían dibujado un escenario más que hecho una predicción. Sus modelos matemáticos no habían considerado el autofrenado de la epidemia al modificarse el comportamiento en la población vulnerable.

En los últimos capítulos, Kucharski narra diferentes momentos vividos en primera persona como investigador de las epidemias del nuevo milenio: zika, chikungunya, dengue y SARS. Su trabajo de campo y su modelización de la propagación de esas infecciones supone un toque de atención y una llamada a la cautela que habremos de mostrar frente a los nuevos agentes de infecciones emergentes y reemergentes.

Al final de la obra, el autor se refiere al empleo de macrodatos para identificar, monitorizar y predecir la propagación de epidemias. Defiende que, en un mundo globalizado, debemos aprovechar las oportunidades que brindan las nuevas tecnologías, aunque no ignora los abusos y errores que puedan generar.

En suma, el libro constituye una narración amena de una retahíla amplia y heterogénea de anécdotas e historias, algunas vividas en primera persona, en relación con las principales epidemias del último siglo. Las consideraciones que van más allá de los agentes infecciosos resultan originales y provocativas.

—Vicente Soriano
Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Internacional de la Rioja



CONTENEDOR AMARILLO S.A.
Alberto Vizcaíno López
Fuera de Ruta, 2020
320 págs.

El reciclaje no es como nos lo habían contado

Por qué la gestión de los residuos de envases ligeros en España no funciona como debería

Uno de los recuerdos que guardo de mi infancia, allá por los años ochenta, es entrar a la tienda de comestibles de mi abuelo y encontrar cajas repletas de botellas de vidrio vacías que los clientes retornaban cuando se llevaban una llena de agua, cerveza o refresco. Recuerdo cómo me gustaba pararme a leer las etiquetas impresas en las botellas y pasear entre las cajas llenas que esperaban a ser recogidas en el almacén. Junto a aquellas cajas, recuerdo también la presencia de sacos llenos de arroz, habichuelas, lentejas y otras legumbres que los clientes compraban a granel.

Cómo hemos cambiado. En un par de décadas hemos borrado casi por completo de nuestros hábitos las compras a granel y los envases reutilizables, los cuales se han visto reemplazados por envases de un solo uso. Esta cultura de usar y tirar, resultado de distintos factores que no son objeto de esta reseña —aunque sí se discuten en el libro reseñado—, ha traído consigo la proliferación desmesurada de residuos y numerosos problemas para el entorno y nuestra salud.

Si usted es aficionado a pasear, seguramente se habrá encontrado con numerosos envases desperdigados que afean y contaminan nuestras calles y parajes naturales. También habrá visto o leído noticias sobre la proliferación de microplásticos desde la Antártida hasta el Everest; sobre animales muertos por la ingestión de plástico; sobre toneladas de residuos almacenados sin control y que acaban contaminando suelo, agua y aire (cuando arden, lo que ocurre con bastante frecuencia); sobre contenedores con residuos plásticos devueltos por Malasia al ser importados ilegalmente; o incluso sobre la presencia en nuestra orina y sangre de ftalatos, fenoles y otros compuestos presentes en los envases plásticos de bebidas y alimentos, por citar algunos ejemplos.

¿Qué respuesta nos da la administración para evitar el impacto ambiental de nuestros residuos? La principal es que los separemos en casa y los depositemos en contenedores de colores para facilitar su recogida selectiva y posterior reciclaje. Pese a que este modelo lleva más de veinte años entre nosotros, todavía nos surgen muchas dudas a la hora de separar nuestros residuos correctamente, y la mayoría desconocemos qué ocurre con ellos una vez que los depositamos en el contenedor. También nos encontramos con información contradictoria sobre el porcentaje de residuos que van al contenedor amarillo en España, el cual va desde el 25 hasta casi el 80 por ciento según la fuente que se consulte. ¿Cómo es esto posible? ¿Por qué una botella de plástico sí puede ir al contenedor amarillo, pero un juguete del mismo material no? Si las cifras de reciclaje son tan elevadas como nos dicen, ¿por qué vemos tantos envases tirados en nuestras

calles y parajes naturales? ¿Quién gestiona el contenedor amarillo? ¿Qué intereses hay detrás? ¿Por qué no podemos volver a un sistema como el de antaño, basado en la reutilización de envases?

A estas y otras muchas preguntas de interés sobre el contenedor amarillo, el reciclaje, nuestro modelo de consumo y las opciones que tenemos para reducir la proliferación descontrolada de envases desechables trata de dar respuesta Alberto Vizcaíno en *Contenedor Amarillo S.A.* El libro nos abre la puerta a una cuestión tan importante como desconocida por el público, que, además, está de plena actualidad por encontrarse en fase de elaboración, en el momento de escribir estas líneas, una nueva Ley de Residuos y Suelos Contaminados.

Con un lenguaje directo, el autor nos explica qué es y cómo opera Ecoembalajes España S.A. (Ecoembes), una sociedad anónima sin ánimo de lucro que gestiona en exclusiva los residuos que depositamos en el contenedor amarillo. Su fin es lograr los objetivos marcados por la legislación ambiental vigente, la cual obliga —en teoría— a los fabricantes de envases a aceptarlos y eliminarlos con el menor impacto ambiental posible tras haber sido utilizados. Vizcaíno esclarece qué ocurre con estos residuos y por qué solo una fracción de ellos acaba convirtiéndose en nueva materia prima. Nos describe las principales deficiencias del sistema y expone los motivos por los que Ecoembes se opone a implantar otros métodos de gestión que se han demostrado más eficaces en otros países, como el de depósito, devolución y retorno (cada vez que se adquiere un envase, se paga un depósito que se recupera al devolver el envase usado).

Encuentro encomiables los esfuerzos del autor por intentar explicar y cuadrar el baile de cifras sobre cuestiones clave, como las tasas de reciclaje real (muy difíciles de conocer debido a la ausencia de información sobre el número de envases que se ponen en el mercado y a la pérdida de trazabilidad de los que se depositan en el contenedor amarillo), así como por presentar un tema muy complejo y con multitud de aristas de una forma amena y entendible por el público general. También hallo muy acertada la discusión sobre modelos alternativos al sistema de gestión integrado de Ecoembes y que permitirían afrontar sus principales deficiencias, y sobre las acciones que, como ciudadanos, podemos llevar a cabo para minimizar el impacto de nuestro consumo. El libro presenta también numerosos datos de interés (como que el contenedor amarillo solo tiene capacidad para acoger al 16 por ciento de los residuos de envases generados en Madrid) y la legislación relevante de una manera entretenida para el lector.

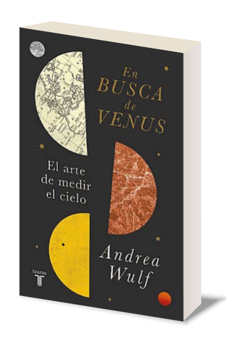
Contenedor Amarillo S.A. cumple con creces las expectativas. No obstante, he echado en falta tanto un índice de contenido como un índice alfabético. El primero ayudaría al lector a hacerse una idea general de lo que va a encontrarse, y el segundo resultaría muy útil para todos aquellos interesados en volver a consultar temas concretos. También sería interesante poder contar con tablas-resumen al final de cada capítulo (o del libro) que compilasen las principales cifras que aparecen a lo largo del texto, así como con un glosario de términos, algo que, seguro, agradecerían los estudiosos y profesionales del reciclaje, quienes sin duda encontrarán este ensayo de gran utilidad para su trabajo.

Nos encontramos, pues, ante un libro muy actual y recomendable para todo aquel interesado en cuestiones ambientales, la gestión de los residuos, el reciclaje y la reducción de nuestro impacto sobre el entorno. Como bien nos cuenta Vizcaíno al comienzo de la obra, «el reciclaje no va a salvar el planeta», y es imperativo un cambio de nuestro modelo de consumo, basado en usar y tirar, hacia otro centrado en la reutilización y la minimización de residuos. Por mencionar una cifra que ilustra la gravedad del problema, en España se venden anualmente más de 9000 millones de unidades de una conocida marca de refrescos: más de un millón cada hora. Si nos paramos a pensar y extrapolamos a los cientos de marcas y a todos los tipos de envases desechables que encontramos en el mercado, podemos hacernos una idea de su volumen y de lo complejo que resulta gestionarlos. No podemos solucionar los problemas que no conocemos, y este libro ayudará a los lectores a conocer en profundidad los problemas que rodean al contenedor amarillo, a reflexionar sobre nuestros hábitos de consumo y a buscar y exigir a nuestros responsables políticos soluciones para uno de los principales retos ambientales y de salud pública a los que nos enfrentamos.

—Fernando T. Maestre
Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio Ramon Margalef, Universidad de Alicante

NOVEDADES

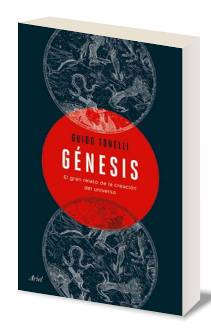
Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



EN BUSCA DE VENUS
EL ARTE DE MEDIR EL CIELO
Andrea Wulf
Taurus, 2020
ISBN: 9788430623211
400 págs. (22,90 €)



ANIMALES EJEMPLARES
Juan Ignacio Pérez y Yolanda González
Next Door Publishers, 2020
ISBN: 978-84-121598-9-9
288 págs. (29 €)



GÉNESIS
EL GRAN RELATO DE LA CREACIÓN DEL UNIVERSO
Guido Tonelli
Areil, 2021
ISBN: 978-84-344-3279-6
224 págs. (19,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

FEBRERO

1971

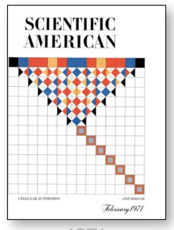
El ordenador más rápido

«La computadora ILLIAC IV, que en breve quedará terminada, es la cuarta generación de una línea de máquinas avanzadas concebidas y desarrolladas en la Universidad de Illinois. La ILLIAC I, una máquina de tubos de vacío terminada en 1952, podía realizar 11.000 operaciones aritméticas por segundo. La ILLIAC II, una computadora de transistores y diodos terminada en 1965, alcanzaba las 500.000 operaciones por segundo. La ILLIAC III es una computadora especializada diseñada para la digitalización de grandes cantidades de datos visuales. La ILLIAC IV, que emplea semiconductores de última tecnología, es en realidad una batería de 64 computadoras "esclavas", capaces de ejecutar entre 100 millones y 200 millones de instrucciones por segundo. A diferencia de sus predecesoras, que resuelven los problemas mediante series de pasos secuenciales, la ILLIAC IV se ha ideado para ejecutar hasta 64 cálculos simultáneamente. Para que esa estructura computacional pueda emplearse eficientemente, el problema debe admitir el procesado en paralelo, no el secuencial. —L. Slotnik»

1921

Los cohetes ganan

«El valor de los cohetes de carga múltiple para la investigación a gran altitud se evidencia al percatarnos de que, salvo para un proyectil disparado desde un cañón, donde se generan unas fuerzas de una intensidad insoportable para unos instrumentos delicados, ese procedimiento es el único que no requiere la presencia de aire. En cuanto a la propulsión más allá del predominio de la gravedad terrestre, la cuestión tal vez más debatida sea: "¿Cómo valorar esa prestación, aun admitiendo que sea físicamente posible?". Esta pregunta sugiere otras: "¿Cómo vamos a recuperar algo lanzado así? ¿Cómo puede regresar un 'voluntario' (de los que ha habido 18)?". Además, la velocidad de 970 kilómetros por segundo, que según el señor Morrison causaría la desintegración del cohete en un rastro incandescente de llamas y humo, no se alcanzaría hasta más de 1100 kilómetros de altitud, a la cual debe existir un vacío absoluto. —R. H. Goddard»



1971



1921



1871

Las cuatro dimensiones del ser

«Del ensayo *Relativity*, de "Zodiaque" (Lyndon Bolton, Londres), ganador de los cinco mil dólares del premio Eugene Higgins: "Por eso, la distancia y el tiempo carecen de la naturaleza que anteriormente se les atribuía. Tal como se presentan a nosotros, son relaciones entre el objeto y el observador que cambian conforme cambia el movimiento relativo a él. El tiempo ya no puede contemplarse como algo independiente de la posición y el movimiento; pero entonces, ¿qué es la realidad? La única respuesta posible es que los objetos debemos contemplarlos como existentes en cuatro dimensiones, tres de las cuales son las ordinarias de longitud, anchura y altura, y la cuarta, el tiempo."»

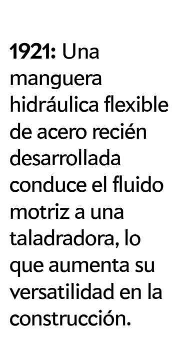
1871

Fauna a la venta

«El comercio de pájaros parece hallarse en situación floreciente. En EE.UU. se importan más de 40.000 canarios al año, y probablemente se críen en el país otros 10.000. El número de camachuelos, jilgueros, zorzales, petirrojos y alondras importados se eleva a entre 500 y 600 para cada variedad. Un total de 3000 gorriones de Java son traídos desde aquella región por los barcos, y un número igual de loros se venden anualmente solo en esta ciudad. Los picos de coral y otras variedades pequeñas escasean y apenas llegan en cantidades superiores a 100 o 200 al año. Los periquitos y los tortolitos de Australia siguen a los loros en importancia relativa.»

Carga letal

«El vapor *England*, que partió de Queenstone el 12 de enero con 200 pasajeros a bordo, se vio obligado a retornar a puerto a causa de la rotura en la bodega, durante una fuerte tormenta, de un número de barriles de polvo decolorante. El gran oleaje penetró en el barco y ello liberó gas cloro en cantidad suficiente para casi asfixiar a todas las personas a bordo. Se intentó retirar el polvo, pero resultó imposible que nadie sobreviviera en la bodega el tiempo necesario para colocar los rezones, y el capitán decidió poner proa a puerto a la máxima velocidad.»





1921: Una manguera hidráulica flexible de acero recién desarrollada conduce el fluido motriz a una taladradora, lo que aumenta su versatilidad en la construcción.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXIV, N.º 9, 26 DE FEBRERO DE 1921



INMUNOLOGÍA

Los estragos inmunitarios de la COVID-19

Akiko Iwasaki y Patrick Wong

El virus prospera porque sabotea el sistema de defensa química de nuestro organismo.

CIENCIAS DEL ESPACIO

Un planeta dinámico

Clara Moskowitz

Durante quince años, la sonda espacial Mars Reconnaissance Orbiter ha cambiado nuestra visión del planeta rojo.



ECOLOGÍA

El declive de las mariposas mediterráneas

Constantí Stefanescu

Los programas de ciencia ciudadana han detectado una disminución preocupante de las poblaciones de estos insectos en las tres últimas décadas. ¿Cuáles son las causas?



PALEONTOLOGÍA

El auténtico *Dilophosaurus*

Matthew A. Brown y Adam D. Marsh

El estudio más completo sobre uno de los dinosaurios icónicos de *Parque Jurásico* muestra una imagen muy diferente de la que nos ofrecía la película.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes* y *Los virus de nuestro cuerpo*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes* y *Las 10 técnicas emergentes más prometedoras del momento*; Gonzalo Claros: *Comienza a aclararse la misteriosa pérdida de olfato debida a la COVID-19*; Pedro Pacheco: *Inteligencia artificial y plegamiento de proteínas*, *¿Cómo influye la pérdida de hábitat en la extinción de especies?* y *La economía de la atención*; Fabio Teixidó: *Supernovas extremas*; Ana Mozo: *Las 10 técnicas emergentes más prometedoras del momento*; Xavier Roqué: *Galileo en tiempos de epidemia*; Mercè Piqueras: *En busca de una fotosíntesis óptima*; Miguel A. Vázquez Mozo: *La paradoja más famosa de la física se acerca a su fin*; Pere Molera: *Cultivo de supercristales a gran velocidad: el ejemplo de la hoganita*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova
17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España